

การทำนายการสั่นสะเทือนย่านความถี่ต่ำของยางล้อเรเดียลด้วยแบบจำลองเชิงโหมด Low Frequency Vibration Prediction of Radial Tire with Modal Models

สิทธิกันต์ วศินพวงศ์วิช* และ จักร จันทลักขณา**

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

ติดต่อ: โทรศัพท์: 02-913-2500 ต่อ 8304, 8308, 8315 โทรสาร: 02-586-9541

E-mail: * sdkvau@gmail.com (corresponding author), ** chak@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

ปัญหาเสียงรบกวนที่แพร่มาจากยางล้อเรเดียล เป็นประเด็นทางการออกแบบวิศวกรรมที่ผู้ผลิตรายเรเดียลบริษัทคนไทยให้ความสำคัญ เนื่องจากมาตรฐานด้านการส่งออกจำเป็นต้องมีการทดสอบดังกล่าว ในงานวิจัยนี้ได้จัดสร้างชุดทดสอบเบื้องต้นเพื่อให้ได้ข้อมูลพลศาสตร์ของยางล้อภายในสภาวะภาระกระทำ ขณะไม่มีการหมุนเพื่อทดสอบเชิงโหมด และนำข้อมูลการทดสอบมาสร้างเป็นแบบจำลองทำนายพฤติกรรมการสั่นสะเทือน โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้เน้นความสำคัญของแนวทางการประยุกต์วิธีการดัดแปลงพลศาสตร์โครงสร้าง (Structural Dynamic Modification) ที่ใช้กับโครงสร้างทั่วไปทางวิศวกรรม แต่สำหรับยางล้อที่มีวัสดุประกอบหลายประเภทภายในทำให้พฤติกรรมอาจไม่เป็นเชิงเส้น ทางคณะวิจัยจะศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วิธีการดัดแปลงโครงสร้างมาพิจารณากระทำกับการใส่ค่าสภาวะขอบเขต (Boundary Conditions) ที่จำลองการกดลงของยางล้อให้เกิดผิวสัมผัสกับพื้น โดยเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่ใช้วิธีดัดแปลงโครงสร้างจากการคำนวณ กับ แบบจำลองที่ได้จากการทดสอบโดยมีค่าสภาวะขอบเขตโครงสร้างที่ดัดแปลงจริง ซึ่งผลจากการศึกษานี้เน้นที่โหมดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่ำ (0-300 Hz) ซึ่งความเป็นไปได้ในการประยุกต์นี้ จะนำไปสู่การวิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นรวมทั้งเสียงรบกวนที่เกิดจากโครงสร้างยางล้อที่โหมดความถี่สูง (300-1000 Hz) ในงานวิจัยต่อไป

คำหลัก: Tire dynamics, Modal Analysis and Testing

Abstract

A tire noise emission problem is the important issue in tire design such that Thai tire manufacturing company is concerned due to requirement from testing standard for export. This study is to construct the preliminary test utility for obtaining the dynamic behavior of loaded tire without rotation. The modal testing is performed to obtain modal data for modeling the tire vibration. The objective of this preliminary study is to study on possibility of use the Structural Dynamic Modification (SDM) which is well-known technique for applying to general structures. However, the tire mechanical components are very complicated in their manufacturing and mechanical properties such as nonlinear behavior. The study is to utilize the SDM technique for modifying the dynamics of an undeformed tire to be a deformed tire from

the applied boundary condition change to the model. The main results are to compare between dynamic behavior of the modified model from calculation of SDM technique and the real modification of the tire. The model is to describe the dynamics of low frequencies of tire vibration (0-300 Hz). The results from this study will be extended to model the dynamic of tire vibration in higher frequencies (300 – 1000 Hz) in future.

1. บทนำ

งานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองเชิงโหมด [1] เพื่อทำนายพฤติกรรมพลศาสตร์ของยางล้อในย่านความถี่ต่ำ (0-300 Hz) ของยางเรเดียลขนาด 185/70R14 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กระบวนการดัดแปลงพลศาสตร์โครงสร้าง (Structural Dynamic Modification, SDM) [2] ที่มีการประยุกต์ใช้กับโครงสร้างทั่วไป แต่ในงานวิจัยนี้ โครงสร้างยางล้อจัดว่ามีความซับซ้อนเนื่องจากมีทั้งการจัดวางชั้นผ้าใบภายใน (Belt) และส่วนวัสดุดอกยาง (Tread) ที่ถือว่ามีความเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลที่ไวต่อลักษณะและทิศทางการเสียรูปโครงสร้าง [3] โดยการทำนายพลศาสตร์จากการดัดแปลงโครงสร้างในเบื้องต้นของงานวิจัยนี้ จะกระทำกับลักษณะการเสียรูปในทิศทางแนวตั้งของยางล้อ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา จะพบว่าการสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ยางล้อในย่านความถี่ต่ำจะใช้แบบจำลองในลักษณะวงแหวนทั้งที่กระทำในแบบสองมิติ (2D Ring) [4] และแบบสามมิติ (3D Ring) [5] ซึ่งแม้ทั้งสองวิธีการจำลองแบบจะสามารถทำนายความถี่ตอบสนองในโหมดการสั่นหน้ายางได้ แต่ยังไม่สามารถจำลองความซับซ้อนทางด้านคุณสมบัติวัสดุที่แปรเปลี่ยนในการเสียรูปได้ถูกต้อง นอกจากแบบจำลองข้างต้น ยังมีแบบจำลองแผ่นเรียบบางที่รวมผลของแก้มยางเข้ามาเพื่อให้สามารถทำนายลักษณะการเสียรูปแนวตั้งของยางได้ถูกต้องมากขึ้นกว่าแบบจำลองวงแหวน [6] ที่รวมกับแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งยังพบข้อจำกัด อาทิเช่น ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมที่สภาวะการรับภาระต่าง และเมื่อมีการหมุนได้ ในอีกแนวทางหนึ่งคือการศึกษาในการสร้างแบบจำลองยางล้อด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงโหมด (Modal Analysis) [7] ซึ่งสามารถใช้ผลจากการ

ทดสอบเชิงโหมด (Modal Testing) มาสัมพันธ์ในส่วนของความไม่แน่นอนของคุณสมบัติวัสดุได้ [3]

จากแนวทางการวิจัยที่ผ่านมา งานวิจัยนี้ต้องการจะศึกษาความเป็นไปได้ในการปฏิบัติกับโครงสร้างยางล้อเช่นเดียวกับงานโครงสร้างทั่วไป [2] ในการดัดแปลงพลศาสตร์โครงสร้าง ซึ่งความเป็นไปได้นี้จะส่งผลต่อการสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ยางล้อที่ลดความซับซ้อนลงได้ และยังคงให้ความสอดคล้องกับผลการทดสอบจริง และสามารถนำไปพิจารณาแบบจำลองที่ทำนายพลศาสตร์ยางล้อในย่านความถี่สูง (300 – 1000 Hz) ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างแก้มยาง (Sidewall) ของยางล้อต่อไปได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอการศึกษาในงานวิจัยนี้ เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองเชิงโหมด (Modal model) ที่ได้จากการทดสอบพลศาสตร์โครงสร้าง และการดัดแปลงโครงสร้างด้วยเทคนิค SDM ดังมีเนื้อหาทฤษฎีประกอบดังต่อไปนี้

2.1 การจำลองแบบเชิงโหมด (Modal Modeling)

แบบจำลองพลศาสตร์เชิงโหมด แบบการหน่วงฮิสเทอเรซิส (Hysteresis damping) [1] ดังแสดงในสมการที่ (1)

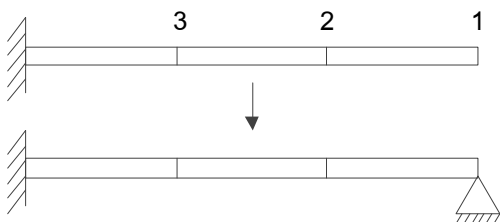
$$H_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \left(\frac{r\phi_j r\phi_k}{\omega_r^2 - \omega^2 + i\eta_r \omega_r^2} \right) \quad (1)$$

โดย $H_{jk}(\omega)$ คือฟังก์ชันตอบสนองความถี่ (Frequency Response Function, FRF) ที่ประกอบไปด้วยข้อมูลตัวแปรทางโหมด (Modal Parameters) โดย 'j' คือตำแหน่งโครงสร้างที่ตรวจวัดการตอบสนอง 'k' คือตำแหน่งโครงสร้างที่ทำการกระตุ้น 'rφ_j' , 'rφ_k' คือค่าเวกเตอร์เจาะจงโดยที่ 'r' คือลำดับโหมดความถี่ธรรมชาติ, 'ω_r' คือค่าความถี่ธรรมชาติ

และ η_r คือค่าการหน่วงแบบฮิสเตอเรซิสของแต่ละโหนด ซึ่งข้อมูลตัวแปรเหล่านี้จะได้จากการประมาณจากผลการทดสอบ FRF ของโครงสร้างยางล้อดังในหัวข้อที่ 3

2.2 การดัดแปลงพลศาสตร์โครงสร้าง (Structural Dynamic Modification, SDM)

ในการดัดแปลงพลศาสตร์โครงสร้างเองนั้น มีหลายเทคนิคที่มีการประยุกต์ใช้กัน ดังในงานวิจัยที่ [2] ซึ่งเทคนิคที่เลือกมาเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์กับโครงสร้างยางล้อที่มีความซับซ้อนทางโครงสร้างนั้นคือเทคนิค Structural Modification Using Response Function (SMURF) [2] โดยเทคนิคนี้จะอาศัยเฉพาะข้อมูลผลการทดสอบหา FRF และนำฟังก์ชันนี้มาดัดแปลงโครงสร้างโดยตรง โดยเบื้องต้นจะพิจารณาเฉพาะกรณียึดตรึงระดับขั้นความเสรี (Degree of Freedom) ที่ต้องการ



รูปที่ 1 ตัวอย่างการดัดแปลงพลศาสตร์โครงสร้างด้วยการยึดตรึงโครงสร้าง

พิจารณารูปที่ 1 ด้านบนซึ่งจุดหมายเลขที่กำหนดคือจุดตรวจวัด FRF โครงสร้างก่อนมีการดัดแปลงเพื่อนำผลที่ได้ไปสร้างแบบจำลองเชิงโหนดที่ทำนาย FRF ของโครงสร้างที่มีการดัดแปลงแบบยึดตรึง 1 จุด ดังรูป โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองเชิงความถี่ X , ฟังก์ชันตอบสนองความถี่ H และแรงกระทำเชิงความถี่ที่จุดต่างๆ F ได้ดังสมการที่ (2)

$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & H_{1,3} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & H_{2,3} \\ H_{3,1} & H_{3,2} & H_{3,3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

เมื่อต้องการทราบความถี่ตอบสนอง $H_{3,2}$ ซึ่งแทนฟังก์ชันตอบสนองความถี่ที่มีแรงกระตุ้นจุดที่ '2' (แรง

กระตุ้นจุดอื่นๆ ไม่มี กรณีนี้เฉพาะ $F_3 = 0$) และการตอบสนองจุดที่ '3' ที่สภาวะขอบเขต $X_1 = 0$ การตอบสนองที่จุด 1 จะสัมพันธ์กับแรงที่จุด '1' กับ '2' ตามสมการที่ (3)

$$X_1 = H_{1,2}F_2 + H_{1,1}F_1 \quad (3)$$

เมื่อแทน $X_1 = 0$ แรงที่จุด '1' ที่ทำให้เกิดการยึดตรึงจะได้ว่า

$$F_1 = -H_{1,1}^{-1}H_{1,2}F_2 \quad (4)$$

การตอบสนองที่จุด '3' ที่สัมพันธ์กับจุดที่ '2' และจุดที่ '1'

$$X_3 = H_{3,1}F_1 + H_{3,2}F_2 \quad (5)$$

ดังนั้นสามารถเขียนฟังก์ชันตอบสนองความถี่ที่มีการดัดแปลงด้วยเทคนิค SMURF $\tilde{H}_{3,2}$ ได้ดังสมการที่ (6)

$$\tilde{H}_{3,2} = \frac{X_3}{F_2} = H_{3,2} - H_{3,1}H_{1,1}^{-1}H_{1,2} \quad (6)$$

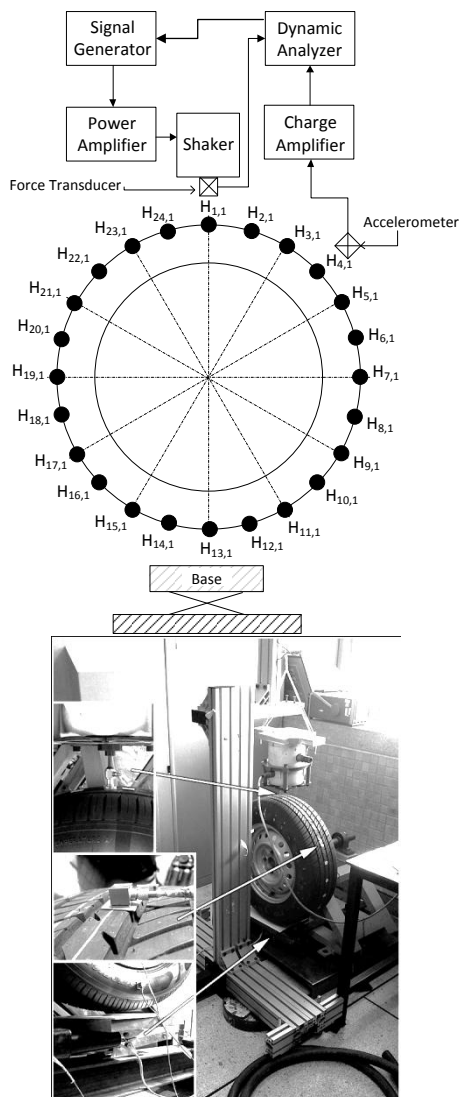
โดยขั้นตอนเช่นเดียวกันนี้สามารถใช้ทำนาย FRF ที่จุดอื่นๆ ได้ ทำให้สามารถประมาณทั้งความถี่ธรรมชาติ ค่าการหน่วงและค่าเวกเตอร์เจาะจงที่เปลี่ยนแปลงได้

3. การทดสอบพลศาสตร์ยางล้อ และแบบจำลองเชิงโหนด

3.1 ชุดทดสอบเชิงโหนดและขั้นตอนการทดสอบ

ยางล้อขนาด 185/70 R14 ที่ใช้ในการทดสอบมีความดันลมยางที่ 34 psi และนำไปยึดกับแท่นทดสอบที่มีความแข็งแรงสูง โดยบังคับให้แกนล้อไม่มีการหมุนทางด้านฐานยางล้อ มีชุดยกแผ่นเหล็กหนา 20 มิลลิเมตร เพื่อทำการจำลองสภาวะภาระกระทำเพื่อจำลองยางล้อขณะอยู่บนพื้นถนน โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเชิงโหนด เพื่อตรวจวัดฟังก์ชันตอบสนองความถี่ (Frequency Response Function, FRF) จากยางล้อจะกระทำโดยการติดตั้งตัวยังสัญญาณความเร่ง (Accelerometer) Bruel and Kjaer™ model 4507B โดยตำแหน่งที่ทำการตรวจวัด ตามเส้นรอบวงยางล้อ จำนวน 24 จุดวัด ดังรูปที่ 2 ยางล้อจะถูกกระตุ้นด้วยตัวเขย่า (Shaker) LDS™ ด้วยสัญญาณแบบเร็นดอมเพื่อประมาณให้เป็นระบบเชิง

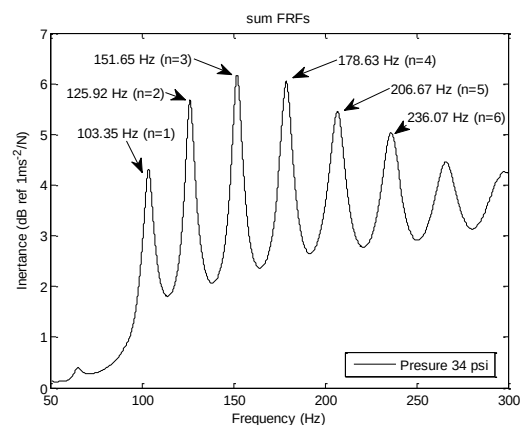
เส้น [1] และที่จุดติดตั้งตัวเขย่ากับยางล้อจะมีตัวหยั่งแรงกระตุ้นเข้า (Force Transducer) ICP™ model 208C01 การทดสอบจะแบ่งออกเป็นสองส่วนกล่าวคือแบบไม่มีภาระกระทำ และมีภาระกระทำที่จำลองด้วยการยกแผ่นเหล็กหนา ให้ฐานยางล้อเกิดการยุบตัวเป็นระยะ 20 มิลลิเมตร โดยการยุบตัวดังกล่าวจะทำให้จุดวัดที่ 13 (รูปที่ 2) เป็นจุดหลักที่เกิดสภาวะขอบเขตแบบยืดตึง โดยจุดวัดที่ 12 และ 14 จะเข้าสัมผัสกับแผ่นเหล็กแต่ไม่เกิดการเสียรูป การทดสอบจะได้ FRF จำนวน 24 ชุดข้อมูลจากการกระตุ้นที่จุดที่ 1 ในการทดสอบแบบไม่มีภาระกระทำ โดยในกรณีแบบมีภาระกระทำ FRF ที่จุดที่ 12, 13 และ 14 จะทำการตรวจวัดที่ด้านใต้แผ่นเหล็กหนาแทน



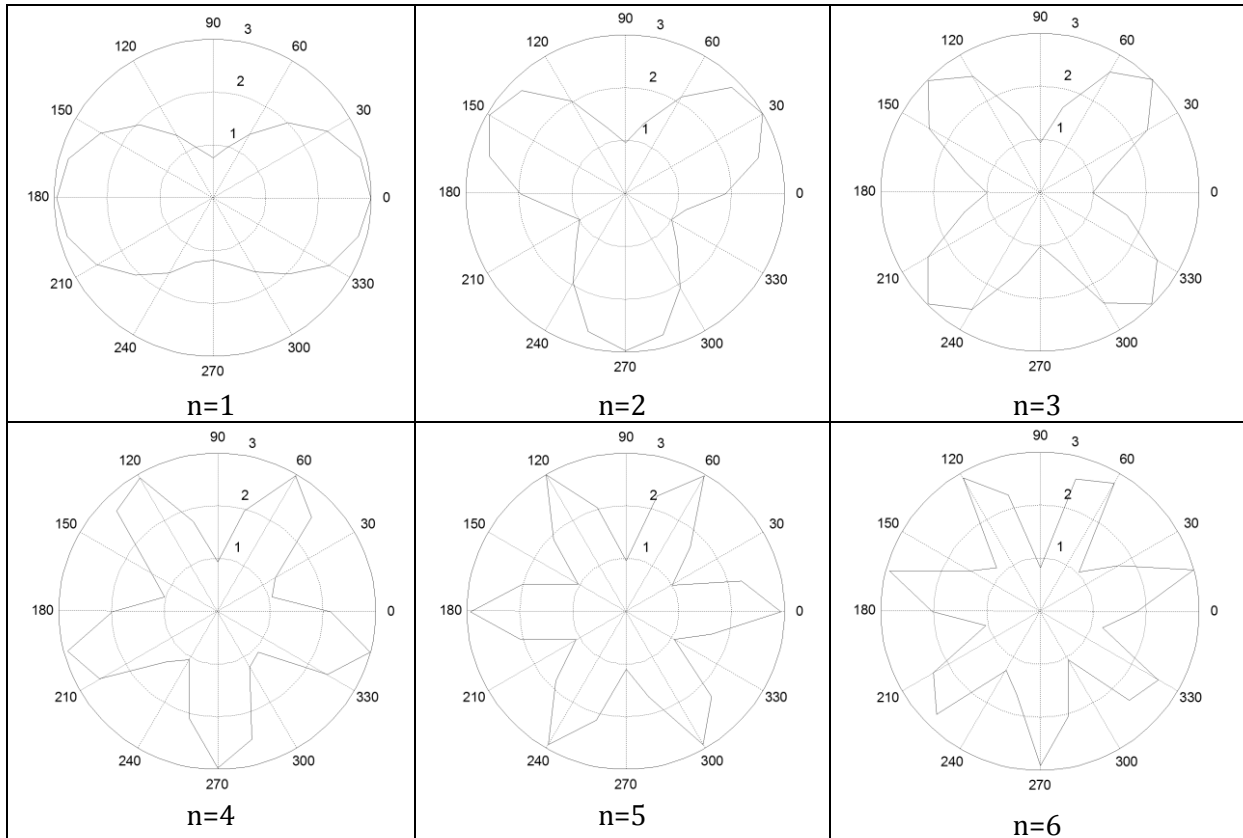
รูปที่ 2 แผนภาพแสดงการวางชุดทดสอบและการกำหนดจุดตรวจวัด และรูปถ่ายชุดทดสอบ

3.2 การสร้างแบบจำลองเชิงโหมด จากผลทดสอบแบบไม่มีภาระกระทำ

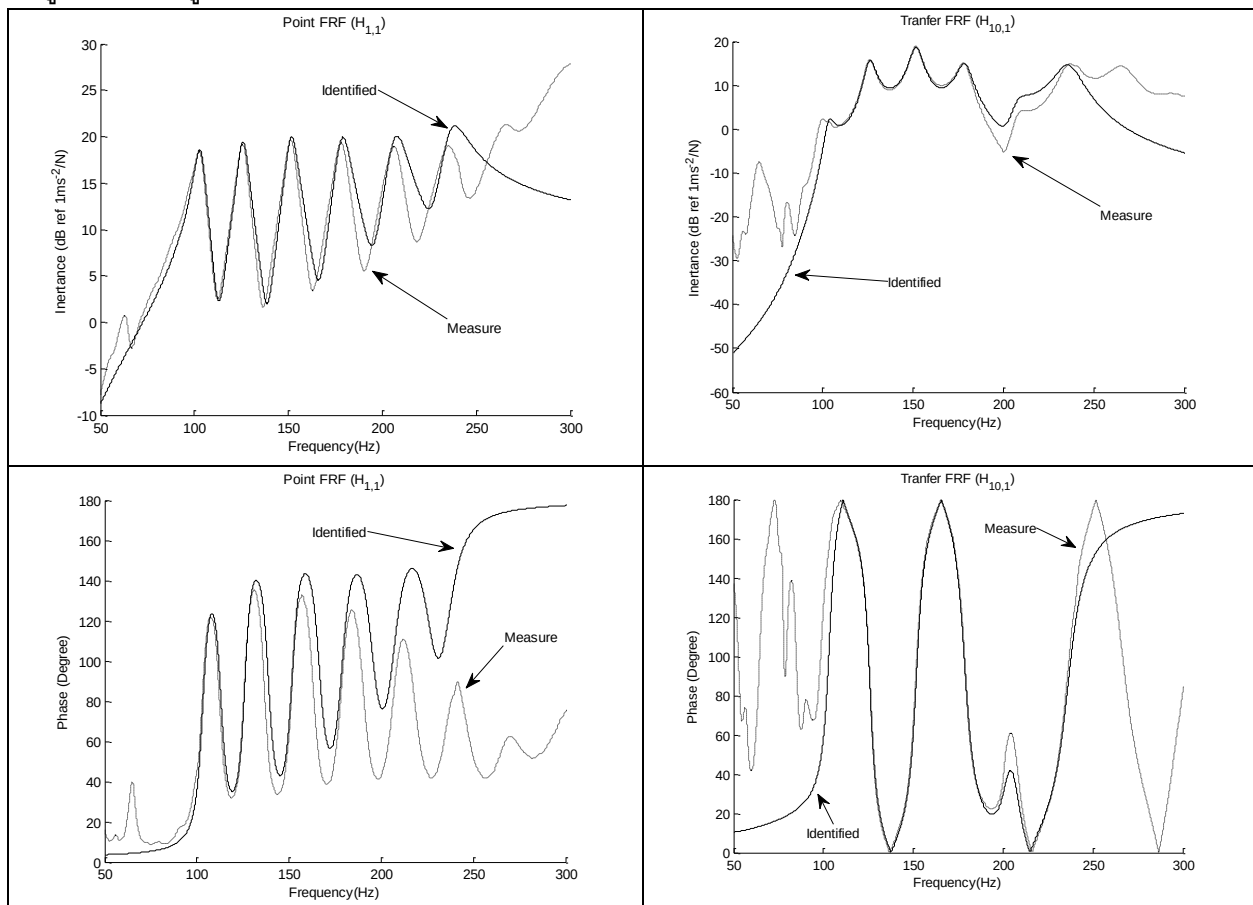
ผลการทดสอบ FRF จำนวน 24 ชุดข้อมูลกรณีการทดสอบยางล้อแบบไม่มีภาระกระทำเท่านั้น ที่จะนำมาสร้างแบบจำลองเชิงโหมด เพื่อนำไปใช้ในการดัดแปลงพลศาสตร์โครงสร้างในหัวข้อต่อไป เพื่อยืนยันโหมดการสั่นเด่น FRF ทั้ง 24 ชุดข้อมูลจะนำมารวมกันเพื่อยืนยันความเป็นโหมด (Summation FRF [1]) ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยงานวิจัยนี้ได้ให้ความสนใจโหมดความถี่ต่ำซึ่งเป็นความถี่ของการดัดตัวของหน้ายางล้อในแนวนอน ซึ่งโหมดที่พบจะอยู่ระหว่างความถี่ 50-250 Hz การระบุโหมดโครงสร้างของยางล้อจะกระทำโดยการนำค่าจำนวนจินตภาพของ FRF มาทำการสร้างรูปร่างการสั่น โดยใน 6 โหมดแรกนี้มีความเป็นโหมดตั้งฉาก โดยรูปร่างการสั่นที่ตรงกับความถี่ธรรมชาติทั้ง 6 โหมดนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 กราฟเฉลี่ย FRFs ที่แรงดันลมยาง 34 psi จากรูปที่ 3 ความถี่ที่เด่นขึ้นมานี้ ยืนยันการเป็นความถี่ธรรมชาติเมื่อพิจารณาจากมุมเฟสของ FRF และ นำไปประมาณหาตัวแปรทางโหมดที่ประกอบไปด้วย ค่าความถี่ธรรมชาติ ค่าการหน่วงและค่าแอมพลิจูดตามสมการที่ (1) ด้วยวิธีการแบบ SDOF curve fitting [1] ที่ใช้กับโหมดตั้งฉาก ทำให้ได้แบบจำลองเชิงโหมดของพลศาสตร์การสั่นยางล้อ ที่จะนำไปดัดแปลงพลศาสตร์โครงสร้าง ด้วยเทคนิควิธี SMURF ในหัวข้อต่อไป โดยในตารางที่ 1 แสดงผลของตัวแปรค่าจะจง คือ ความถี่ธรรมชาติ และค่าอัตราส่วนการหน่วง ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองนี้



รูปที่ 4 แสดงรูปร่างการสั่นของโหมดความถี่ธรรมชาติ กรณีแบบไม่มีภาระกระทำ ในย่านความถี่ 50-250 Hz



รูปที่ 5 กราฟ identified FRF แบบ Point FRF (ซ้าย) และ Transfer FRF (ขวา) ทั้งขนาดและมุมเฟส

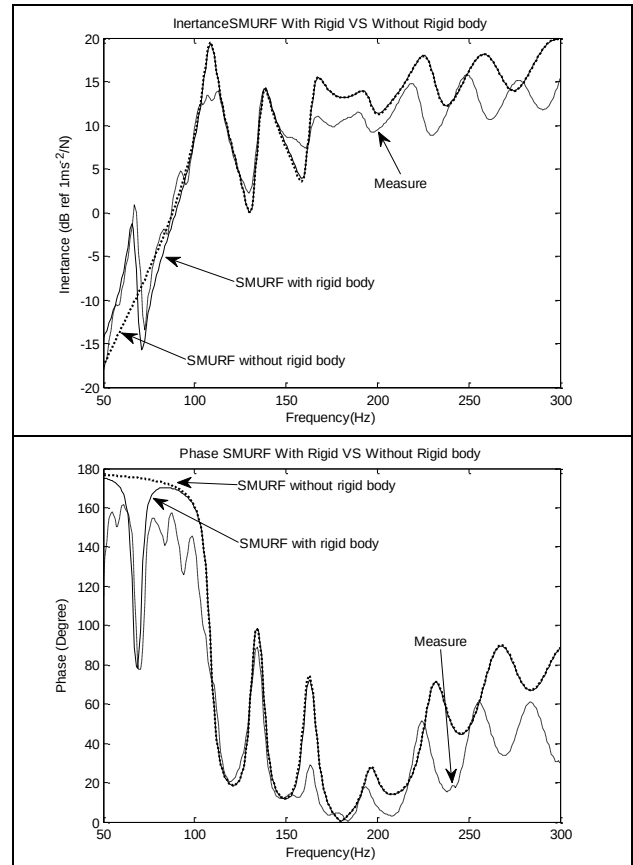
ตารางที่ 1 ข้อมูลทางโมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบ

โมเมนต์ r	ไม่มีภาระกระทำ		มีภาระกระทำ	
	$\omega_r/2\pi$ (Hz)	η_r	$\omega_r/2\pi$ (Hz)	η_r
1	102.99	0.0587	111.38	0.1044
2	125.88	0.0470	140.38	0.0481
3	151.82	0.0467	167.84	0.0580
4	178.52	0.0550	199.12	0.0535
5	207.51	0.0589	228.88	0.0626
6	236.51	0.0883	259.39	0.0935

รูปที่ 5 แสดง FRF ที่ได้จากแบบจำลองเชิงโมเมนต์ (Identified FRF) เปรียบเทียบกับ FRF ที่ตรวจวัดจริง ทั้งในตำแหน่งจุดวัดเดียวกับการกระตุ้น (Point FRF) H1,1 และที่ตำแหน่งจุดวัดต่างกับจุดการกระตุ้น (Transfer FRF) H10,1 ทั้งขนาดและมุมเฟส จะสังเกตเห็นได้ว่า ในย่านความถี่ 50-80 Hz จะมีโหมดลักษณะแบบเชิงเกร็งในลักษณะที่หน้ายางไม่ได้มีการเสียรูปเกิดขึ้นด้วย ซึ่งผลกระทบจากการที่ไม่ได้รวมโหมดเชิงเกร็งดังกล่าว [8] ดังจะได้กล่าวถึงต่อไป

4. การดัดแปลงพลศาสตร์โครงสร้างยางล้อ

การดัดแปลงพลศาสตร์โครงสร้างยางล้อที่จำลองสภาวะขอบเขตโดยการยึดตรึงบริเวณจุดวัดที่ 13 โดยใช้ผลการทดสอบ FRF จากกรณียางล้อไม่มีภาระกระทำตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 2.2 โดยจะทำการคำนวณเพื่อหา FRF ที่มีการดัดแปลงทั้งหมดจาก 23 จุดที่ไม่ได้มีการยึดตรึง โดย FRF ที่คำนวณได้หรือจะเรียกต่อไปว่า SMURF FRF จะสามารถพล็อตเปรียบเทียบกับ Measured FRF ที่เป็นการใส่สภาวะขอบเขตจากผลของภาระกระทำจริง ดังแสดงในรูปที่ 6 และข้อมูลทางโมเมนต์ที่ได้จากกราฟ SMURF FRF ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบจริง Measured FRF กรณีมีภาระกระทำของตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกัน โดยผลของรูปร่างการสั่นในแต่ละโหมดที่สร้างจากกราฟ SMURF FRF เองก็มีความสอดคล้องกับ Measured FRF ดังแสดงเฉพาะส่วนของ SMURF FRF ในรูปที่ 7

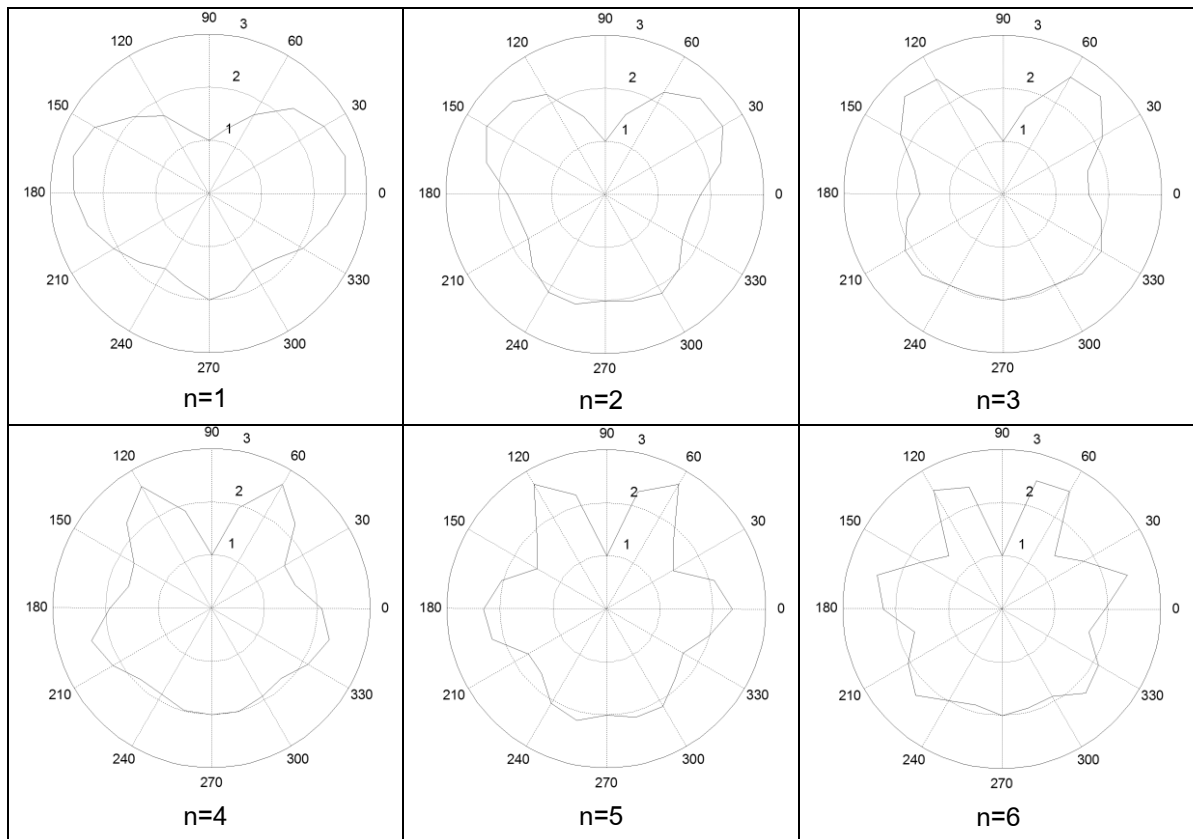


รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบ SMURF FRF กับ Measured FRF (บน) ขนาด (ล่าง) มุมเฟส และเปรียบเทียบกรณี รวมและไม่รวม โหมดเชิงเกร็ง

ตารางที่ 2 ข้อมูลทางโมเมนต์ที่ได้จากเทคนิค SMURF

โมเมนต์	SMURF FRF	
	$\omega_r/2\pi$ (Hz)	η_r
1	108.90	0.0573
2	137.41	0.0488
3	165.85	0.0503
4	195.07	0.0618
5	227.34	0.0678
6	259.99	0.0837

ตามที่ได้มีการศึกษาถึงผลกระทบของโหมดเชิงเกร็งต่อผลการทำนายพลศาสตร์โครงสร้างด้วยเทคนิค SMURF [8] อย่างไรก็ตามพบว่า การรวมโหมดเชิงเกร็งในลักษณะที่หน้ายางล้อไม่ได้มีการเสียรูปนั้น ไม่มีผลกระทบต่อการทำนายโหมดแต่อย่างใดในการศึกษาครั้งนี้ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 7 แสดงรูปร่างการสั่นที่ประมาณได้จากกราฟ SMURF FRF

ซึ่งถ้าพิจารณาจากลักษณะแบบจำลองที่นิยมใช้ในการทำนายการสั่นของหน้ายาง [2] จะจำลองให้แนวเส้นรอบวงของหน้ายางมีแรงดึงในแนวแกนตามวงรอบหน้ายาง ซึ่งทำให้ลักษณะโหมดแข็งเกร็งนี้ไม่ใช่โหมดแข็งเกร็งแท้ (Real Rigid body Mode) แต่เป็นโหมดแข็งเกร็งในลักษณะการจำลองแบบก้อนมวลเดี่ยว (Single Lumped-mass model) ทำให้ในการในการประยุกต์ใช้เทคนิค SMURF กับการสั่นในย่านความถี่ต่ำนี้ ไม่จำเป็นต้องรวมโหมดดังกล่าว อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่ามีผลกระทบจากการที่ตัดโหมดความถี่สูงออกจากแบบจำลอง (Truncated model) [2] ทำให้ขนาดของกราฟ SMURF FRF ไม่ตรงกับ Measured FRF ที่โหมดสูงๆ

5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างแบบจำลองพลศาสตร์การสั่นสะเทือน ของยางล้อภายใต้สภาวะภาระกระทำแนวตั้ง ด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองเชิงโหมดจากผลการทดสอบและ การดัดแปลงแบบจำลองด้วยเทคนิคการดัดแปลงพลศาสตร์โครงสร้าง (SDM)

พบว่าสามารถประยุกต์ใช้กับโครงสร้างยางล้อที่มีความซับซ้อนของชิ้นส่วนประกอบภายในได้ เช่นเดียวกับ ที่ได้มีการประยุกต์ใช้กับโครงสร้างทางกลทั่วไป ทำให้แบบจำลองที่ได้มีความสอดคล้องกับพลศาสตร์การสั่นสะเทือนในย่านความถี่ต่ำ (0-300 Hz) ของยางล้อจริง ซึ่งแบบจำลองที่ได้มีความซับซ้อนในการสร้างแบบจำลองน้อย และสามารถบรรยายคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องโดยหลักของพลศาสตร์การสั่นโครงสร้าง อาทิเช่น ค่าคุณสมบัติการหน่วง ความแข็งดึงโครงสร้าง ในสภาวะแรงกระทำแนวตั้ง

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในย่านความถี่สูงกว่า 300 Hz ขึ้นไปอาจจะพบว่า การจำลองแบบโดยใช้โหมดดังกล่าว [1] อาจจะไม่เหมาะสมเนื่องจากค่าการหน่วงวัสดุที่มากขึ้น และเป็นพฤติกรรมการสั่นพัวไหวของแก้มยางที่เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งในการศึกษาต่อไป จะทำการจำลองแบบในลักษณะโหมดแข็งซ้อน และให้ระดับขั้นความเสรีที่พิจารณาครอบคลุมการบรรยายพฤติกรรมในทิศทางอื่นๆ เพื่อสร้างแบบจำลองเชิงโหมดที่สามารถบรรยายสภาวะภาระกระทำที่เป็นแรง

ในระนาบของพื้นถนนได้ รวมถึงจะศึกษาการปรับปรุงวิธีการดัดแปลงพลศาสตร์โครงสร้าง ให้สามารถวิเคราะห์ทำนายการแปรเปลี่ยนตัวแปร อาทิเช่นความแข็งแรงโครงสร้างแก้มยาง แม้วิธีการที่น่าเสนอนี้จะพบว่ามีข้อจำกัดที่เป็นการจำลองแบบ ณ สภาวะการทดสอบหนึ่ง ๆ เท่านั้นแต่แบบจำลองที่ได้มีความซับซ้อนน้อยและเหมาะสมกับแสดงให้เห็นถึงการทำนายพลศาสตร์การสั่นยางล้อเบื้องต้นที่สามารถช่วยให้ผู้ออกแบบยางล้อเชิงอุตสาหกรรมในประเทศได้เข้าใจในผลกระทบด้านตัวแปรต่างๆ ต่อพลศาสตร์การสั่นโดยแบบจำลองที่ซับซ้อนอื่นๆ อาทิเช่น การจำลองแบบร่วมกับวิธีการทางไฟไนต์อีลิเมนต์และบาร์ดาร์อีลิเมนต์ จะช่วยในการจำลองผลกระทบที่เกิดจากการสั่นต่อมาคือด้านเสียงรบกวนขณะที่ยางล้อมีการทำงานหมุนได้ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก ทุนสนับสนุนนักวิจัยทั่วไป สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ซึ่งคณะวิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ewins, D.J. (1984). *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, Research Studies Press Ltd., Hertfordshire.
- [2] Avitabile P. (2003). Twenty Years of Structural Dynamic Modification – A Review, *Sound and Vibration Magazine*, (January 2003), pp. 14-25.
- [3] Blom R.E.A. (2005). *Modeling Tyre Vibrations – a modal approach*, Internal Report DCT 2005.02, Eindhoven University of Technology.
- [4] Kropp W.. (1989). Structure-borne sound on a smooth tyre, *Applied Acoustics*, Vol. 26, pp. 181–192.
- [5] Kindt P., Sas P. and Desmet W. (2009). Development and validation of a three-dimensional ring-based structural tyre model,

Journal of Sound and Vibration, Vol. 326, pp. 852–869.

[6] Pinnington R.J. AND Briscoe A.R. (2002). A Wave model for a pneumatic tyre belt, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 253, pp. 941-959.

[7] Lopeza I., Blomb R.E.A., Roozena N.B. and Nijmeijera H. (2007). Modelling vibrations on deformed rolling tyres—a modal approach, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 307, pp. 481–494.

[8] วรเทพ กุัสमानเกียรติ และ จักร จันทลักขณา (2549). ผลกระทบและการประมาณค่าพารามิเตอร์ของโหมดแข็งเกร็งในการสร้างแบบจำลองโมดัลสำหรับการดัดแปลงพลศาสตร์โครงสร้าง, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20*, 18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา