

การจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ของระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัทร่วมกับแรงเสียดทานภายในโช้คอัพ

Dynamic Modeling of MacPherson Strut Suspension with Friction in Shock Absorber

อำนาจ อิ่มเจริญ^{1*}, ชัยพร นันทกิจ², ภาคภูมิ วิบูลชัยชีพ³, สันหพศ จันทรานัฐวัฒน์⁴

^{1,2,3} แผนกพัฒนาผลิตภัณฑ์ บริษัทบางกอกสปริงอินดัสเตรียล จำกัด

112 หมู่ 2 กม. 15 ถ.บางนาตราด ต.บางโฉลง อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ 10540

โทรศัพท์ 02-728 8500 ต่อ 8649 โทรสาร 02-728 8768

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กทม 10330

โทรศัพท์ 081-923-4513

^{1*}อีเมล umnat.i@somboon.co.th ²อีเมล chaiyaporn.n@somboon.co.th

³อีเมล pakpoom.v@somboon.co.th ⁴อีเมล sunhapos@gmail.com

บทคัดย่อ

การติดตั้งโช้คอัพในระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัทโดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเอียงทำให้เกิดแรงเสียดทานภายในโช้คอัพ ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ของระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัทจึงจำเป็นต้องพิจารณาแรงเสียดทานของโช้คอัพรวมในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องการศึกษาความนุ่มนวลในการขับขี่ ในบทความนี้ผู้วิจัยได้เลือกพฤติกรรมของแรงเสียดทานแบบคูลอมบ์ (Coulomb Friction) โดยทำการหาค่าแรงเสียดทานภายในโช้คอัพ ด้วยวิธีการ Optimization แบบ Nonlinear Least Square เพื่อหาค่า smooth friction ที่ทำให้ได้ฮิสเตอร์ซิสสอดคล้องกับผลการทดสอบ จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าความเร่งในการสั่นสะเทือนของมวลส่วนสปริงรองรับ (Sprung Mass) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อความนุ่มนวลในการขับขี่รถยนต์ โดยพิจารณาอินพุตที่กระตุ้นระบบรองรับที่มีลักษณะเป็นลูกกระพอนที่ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที ซึ่งผลจากแบบจำลองที่มีแรงเสียดทานใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงมากกว่าแบบจำลองที่ไม่มีแรงเสียดทาน

คำหลัก: แมคเฟอร์สันสตรัท; แรงเสียดทานแบบคูลอมบ์; ฮิสเตอร์ซิส

Abstract

A shock absorber is mostly installed on an inclined axis in a MacPherson Strut Suspension. This causes significant friction between the piston-cylinder and piston rod-slideway within the shock absorber. Hence, a friction model is required in a dynamic model of the MacPherson Strut Suspension for more accurate simulation result especially when studying ride comfort. This article shows a selected friction model called a coulomb friction along with a Nonlinear Least Square method to find parameters of smooth friction that causes hysteresis corresponding to experimental results. Road bump with speed of 0.1 m/s is then used to simulate the acceleration of Sprung mass that influence ride comfort. It was found that the simulation results from the model with friction are more accurate when compared to the experimental results than that of the model without friction.

DRC-7

Keywords: MacPherson Strut; Coulomb Friction; Hysteresis

1. บทนำ

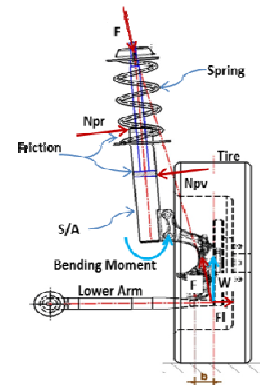
ระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัทถูกคิดค้นโดย Earl S. MacPherson ในปี 1949 ซึ่งมีน้ำหนักเบาและต้นทุนต่ำ ระบบรองรับชนิดนี้จึงถูกใช้อย่างกว้างขวางในรถยนต์สมัยใหม่ โดยส่วนใหญ่จะพบในระบบรองรับด้านหน้าของรถยนต์ สำหรับระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัทจะประกอบด้วยคอยล์สปริงและโช้คอัพที่มีลักษณะการติดตั้งที่เอียง ซึ่งน้ำหนักของตัวรถมีผลกระทบทำให้เกิดแรงต้านข้างกระทำภายในโช้คอัพ 2 จุดคือระหว่างลูกสูบกับกระบอกสูบและระหว่างก้านสูบกับซีล มีผลทำให้เกิดแรงเสียดทานด้านการเคลื่อนที่ของลูกสูบและก่อให้เกิดความเสียหายต่อโช้คอัพ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบโดยตรงต่อความนุ่มนวลในการขับขี่รถยนต์ [1-2]

ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ของระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัทจึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาแบบจำลองของแรงเสียดทานที่สัมพันธ์กับแรงต้านข้างที่กระทำกับโช้คอัพร่วมด้วย เพื่อให้การจำลองในการสั่นสะเทือนของมวลส่วนสปริงรองรับมีความแม่นยำและสอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงบนระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัท

2. ทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้อง

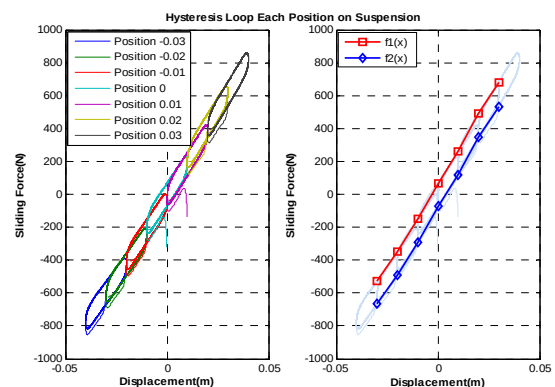
2.1 แบบจำลองแรงเสียดทานแบบคูลอมบ์

แรงต้านของน้ำหนักบรรทุกจากพื้นถนน (W) ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดกระทำที่โช้คอัพ ทำให้เกิดแรงต้านข้าง 2 จุด คือระหว่างลูกสูบกับกระบอกสูบ (N_{pv}) และระหว่างก้านสูบกับซีล (N_{pr}) ดังรูปที่ 1 ซึ่งแรงต้านข้างนี้ทำให้เกิดแรงเสียดทานภายในโช้คอัพ โดยในปัจจุบันเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น การออกแบบคอยล์สปริงจะมีการควบคุมทิศทางแรงต้านข้างจากคอยล์สปริงให้มีทิศทางหักล้างกับแรงต้านข้างภายในโช้คอัพ แต่ยังคงไม่สามารถหักล้างได้ทั้งหมด



รูปที่ 1 การเกิดแรงต้านข้างในโช้คอัพของระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัท

ในการพิจารณาพฤติกรรมของแรงเสียดทานจากแรงต้านข้างร่วมกับแรงสปริงและผลกระทบจากการเอียงของชุดสตรัท โดยทำการทดลองบนระบบรองรับที่ชุดสตรัทปราศจากน้ำมันในแต่ละตำแหน่งของการเคลื่อนที่ด้วยระยะช่วงชักและความเร็วคงที่ ตามรูปด้านล่าง



รูปที่ 2 ฮิสเตอรีซิสในแต่ละตำแหน่งบนระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัท

จากฮิสเตอรีซิสที่ได้จากการทดลองในแต่ละตำแหน่งสามารถหาความสัมพันธ์ของแรงเสียดทานร่วมกับแรงสปริงได้ตามสมการดังนี้

$$f_1(\Delta x) = -1E + 06\Delta x^3 + 19982\Delta x^2 + 21191\Delta x + 59.079 \quad (1)$$

$$f_2(\Delta x) = -1E + 06\Delta x^3 + 17295\Delta x^2 + 21101\Delta x - 81.407 \quad (2)$$

DRC-7

$$F_{fr1}(\Delta x, \Delta v) = \frac{f_1(\Delta x)(1 + \frac{2}{\pi} \arctan(\varepsilon \Delta v))}{2} \quad (3)$$

$$F_{fr2}(\Delta x, \Delta v) = \frac{f_2(\Delta x)(1 - \frac{2}{\pi} \arctan(\varepsilon \Delta v))}{2} \quad (4)$$

$$F_{fr}(\Delta x, \Delta v) = F_{fr1}(\Delta x, \Delta v) + F_{fr2}(\Delta x, \Delta v) \quad (5)$$

โดยที่

$F_{fr1}(\Delta x, \Delta v)$ คือ แรงต้านเมื่อก้านสูบยืด

$F_{fr2}(\Delta x, \Delta v)$ คือ แรงต้านเมื่อก้านสูบหด

$f_1(\Delta x)$ คือ ฟังก์ชันแรงต้านเมื่อก้านสูบยืด

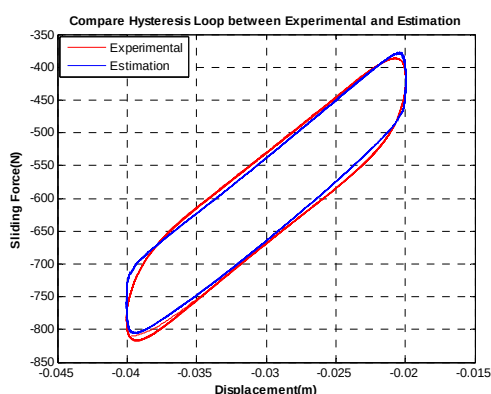
$f_2(\Delta x)$ คือ ฟังก์ชันแรงต้านเมื่อก้านสูบหด

ε คือตัวแปร smooth friction

$\Delta x = y - z$ คือผลต่างการกระจัดระหว่าง มวล M_s และ M_{us} (m)

$\Delta v = \dot{y} - \dot{z}$ คือผลต่างความเร็วระหว่างมวล M_s และ M_{us} (m/s)

เมื่อนำความสัมพันธ์ของแรงเสียดทานและแรงสปริงมาประเมินค่าเทียบกับผลการทดลอง โดยใช้กระบวนการ Optimization แบบ Nonlinear Least Square ในโปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อกำหนดค่าของ ε ที่เหมาะสม จะได้ผลตามรูปด้านล่างนี้



รูปที่ 3 เปรียบเทียบฮิสเทอรีซิสระหว่างการประมาณค่ากับการทดลอง

ผลจากการประมาณค่าของแรงเสียดทานร่วมกับแรงสปริงและผลกระทบจากการเอียงของชุดสตรัท มีค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ 10.548 ซึ่งคำนวณจากสมการดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2}{n}} \quad (6)$$

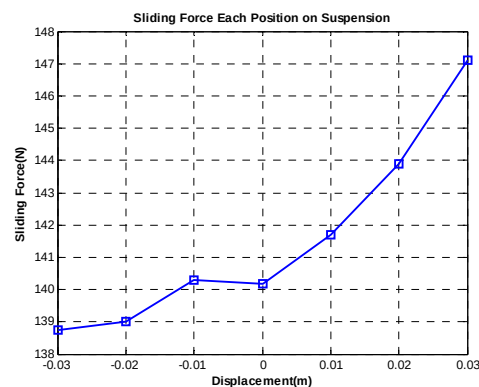
โดยที่

n คือ จำนวนของจุดข้อมูล

X_i คือ ข้อมูลจากการประมาณค่า

$\hat{X}_i$ คือ ข้อมูลจากการทดลอง

แรงต้านข้างในโช้คอัพที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนของระบบรองรับแต่ละตำแหน่งมีค่าที่แตกต่างกัน ส่งผลทำให้แรงเสียดทานแตกต่างกันไปตามตำแหน่งบนระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัทตามรูปด้านล่าง นอกจากนี้แล้วรูปนี้ยังสามารถแสดงถึงความสามารถของสปริงที่ใช้ต้านแรงต้านข้างในว่าสามารถทำได้ดี



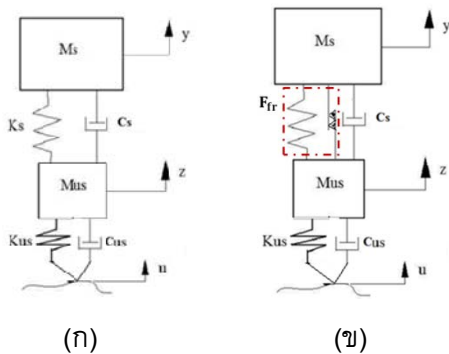
รูปที่ 4 แรงเสียดทานแต่ละตำแหน่งบนระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัท

2.2 แบบจำลองระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัท

แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ที่นิยมคือแบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่ เนื่องจากมีความซับซ้อนของการคำนวณน้อยทำให้สามารถเข้าใจถึงผลลัพธ์

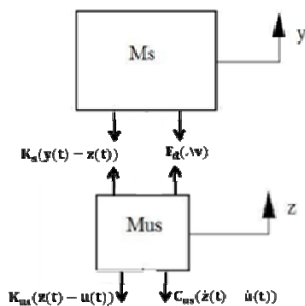
DRC-7

ของการสั่นสะเทือนได้โดยง่าย แบบจำลองชนิดหนึ่งในสี่มีระดับขั้นเสรีเท่ากับ 2 ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 5 แบบจำลองหนึ่งในสี่ของระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัทแบบไม่มีแรงเสียดทาน(ก)และมีแรงเสียดทาน(ข)

การสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ของระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัทแบบไม่มีแรงเสียดทานตามรูปที่ 5(ก) สามารถพิจารณาได้จากการเขียน Free Body Diagram ตามรูปด้านล่างนี้



รูปที่ 6 Free Body Diagram ของมวล M_s และ M_{us}

โดยสมการการเคลื่อนที่ของมวล M_s คือ

$$M_s \ddot{y}(t) = -K_s(y(t) - z(t)) - F_d(\Delta v) \quad (7)$$

และสมการการเคลื่อนที่ของมวล M_{us} คือ

$$M_{us} \ddot{z}(t) = K_s(y(t) - z(t)) + F_d(\Delta v) - C_{us}(\dot{z}(t) - \dot{u}(t)) - K_{us}(z(t) - u(t)) \quad (8)$$

ซึ่งสมการที่ 7 และ 8 สามารถจัดเรียงในรูปของสมการ State Space ได้ดังนี้

$$\dot{X}(t) = \mathbf{A}X(t) + \mathbf{B}U(t) \quad (9)$$

$$Y(t) = \mathbf{C}X(t) + \mathbf{D}U(t) \quad (10)$$

โดยที่

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{(K_s + K_{us})}{M_{us}} & \frac{K_s}{M_{us}} & -\frac{C_{us}}{M_{us}} & 0 \\ \frac{K_s}{M_s} & -\frac{K_s}{M_s} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{us}}{M_{us}} & \frac{1}{M_{us}} & \frac{C_{us}}{M_{us}} & \frac{1}{M_{us}} \\ 0 & -\frac{1}{M_s} & 0 & -\frac{1}{M_s} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ -\frac{(K_s + K_{us})}{M_{us}} & \frac{K_s}{M_{us}} & -\frac{C_{us}}{M_{us}} & 0 \\ \frac{K_s}{M_s} & -\frac{K_s}{M_s} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{us}}{M_{us}} & \frac{1}{M_{us}} & \frac{C_{us}}{M_{us}} \\ 0 & -\frac{1}{M_s} & 0 \end{bmatrix}$$

$$Y(t) = \begin{bmatrix} \Delta x(t) \\ \Delta v(t) \\ \ddot{z}(t) \\ \ddot{y}(t) \end{bmatrix}, X(t) = \begin{bmatrix} z(t) \\ y(t) \\ \dot{z}(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix}$$

$$U(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ F_d(\Delta v) \\ \dot{u}(t) \end{bmatrix}$$

โดยที่

DRC-7

$u(t)$ คือ การกระจัดของถนน(m)

$z(t)$ คือ การกระจัดของมวล M_{us} (m)

$y(t)$ คือ การกระจัดของมวล M_s (m)

$\Delta x = y - z$ คือผลต่างการกระจัดระหว่าง มวล M_s

และ M_{us} (m)

$\Delta v = \dot{y} - \dot{z}$ คือผลต่างความเร็วระหว่างมวล M_s และ M_{us} (m/s)

ส่วนแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ของระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัทแบบมีแรงเสียดทานตามรูปที่ 5(ข) สมการการเคลื่อนที่ที่จะมีการพิจารณาแรงเสียดทานร่วมกับแรงสปริงและผลกระทบจากการเอียงของชุดสตรัท โดยสมการการเคลื่อนที่ของมวล M_s คือ

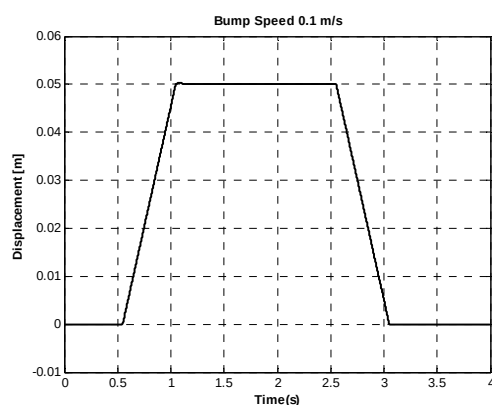
$$M_s \ddot{y}(t) = -F_d(\Delta v) - F_{fr}(\Delta x, \Delta v) \quad (11)$$

และสมการการเคลื่อนที่ของมวล M_{us} คือ

$$M_{us} \ddot{z}(t) = F_d(\Delta v) + F_{fr}(\Delta x, \Delta v) - C_{us}(\dot{z}(t) - \dot{u}(t)) - K_{us}(z(t) - u(t)) \quad (12)$$

3. การจำลองระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัท

การจำลองการเคลื่อนที่ของมวลส่วนสปริงรองรับในที่นี้จะใช้โปรแกรม MATLAB ที่เขียนขึ้นจากสมการการเคลื่อนที่โดยกำหนดให้รถยนต์วิ่งผ่านลูกระนาดซึ่งมีความสูง 50 มม. ตามรูปด้านล่าง

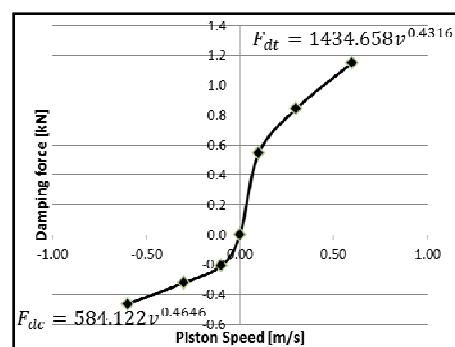


รูปที่ 7 สัญญาณอินพุตลูกระนาดความเร็ว 0.1 m/s

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรคุณสมบัติของระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัท

ตัวแปรคุณสมบัติของระบบรองรับ	ค่าที่วัดได้
ค่าความแข็งสปริงของล้อยางที่แรงดันลม 32 psi (K_{us})	288,000 N/m
ค่าความแข็งสปริงของระบบรองรับ (K_s)	19,500 N/m
มวลส่วนสปริงไม่ได้รับรองรับ (M_{us})	45.16 kg
มวลส่วนสปริงรองรับ (M_s)	348.55 kg
ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของล้อยางที่แรงดันลม 32 psi (C_{us})	1194 Ns/m

ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโช้คอัพ C_s ทดสอบตามมาตรฐาน JASO C605 [4]



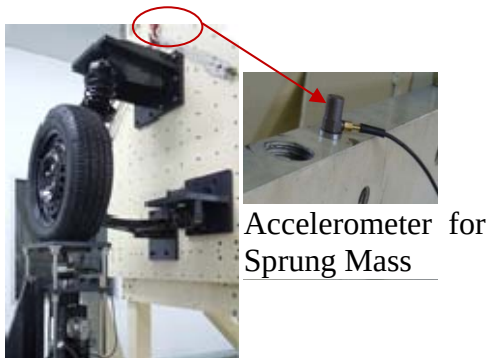
รูปที่ 8 กราฟคุณลักษณะแรงหน่วงของโช้คอัพ

4. การทดสอบผลการจำลองระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัท

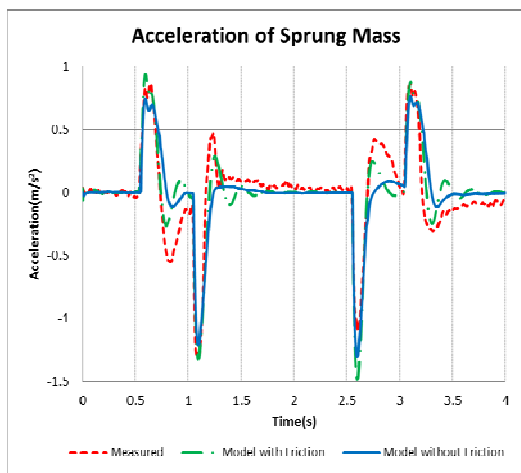
การยืนยันความเหมาะสมของการใช้แบบจำลองหนึ่งในสี่พิจารณาจากการทดสอบผลการจำลองการเคลื่อนที่ของมวลส่วนสปริงรองรับที่ได้จากแบบจำลองที่ไม่มีแรงเสียดทานและมีแรงเสียดทานเมื่อใช้การกระตุ้นจากลูกระนาดที่มีความเร็ว 0.1 m/s เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ใช้ Actuator กระตุ้นระบบรองรับด้วยอินพุตในลักษณะเดียวกันและวัดการสั่นสะเทือน

DRC-7

ด้วย Accelerometer(B&K Type 4397 Sensitivity : 1.033mV/ms^{-2} , Frequency Range : Amplitude ($\pm 10\%$) 1 Hz to 25 kHz) ใช้ Sampling rate ที่ 1024 Hz โดยติดตั้งกับมวลส่วนสปริงรองรับ(Sprung Mass) ตามรูปด้านล่าง



รูปที่ 9 การติดตั้งAccelerometer สำหรับวัดการสั่นสะเทือนของระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัท



รูปที่ 10 เปรียบเทียบความเร่งในการสั่นสะเทือนของมวลส่วนสปริงรองรับ

จากรูปที่แสดงด้านบน ผลการจำลองสัญญาณความเร่งในการสั่นสะเทือนของมวลส่วนสปริงรองรับด้วยแบบจำลองที่ไม่มีแรงเสียดทานมีค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย(RMSE) เท่ากับ 0.186 ส่วนแบบจำลองที่มีแรงเสียดทานร่วมกับแรงสปริงมีค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย(RMSE) เท่ากับ 0.154 ซึ่งแบบจำลองที่มีแรงเสียดทานร่วมกับแรงสปริงจะมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงมากกว่าแบบจำลองที่ไม่มี

แรงเสียดทานนอกจากนี้เรายังพบว่าแบบจำลองที่มีแรงเสียดทานนั้นยังสามารถจำลองส่วนจุดยอดต่างๆของการสั่นสะเทือนได้ดีกว่าอีกด้วย

5. สรุป

การจำลองสัญญาณความเร่งในการสั่นสะเทือนของมวลส่วนสปริงรองรับในระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัทที่มีการพิจารณาแรงเสียดทานแบบคูลอมบ์ที่ได้จากวิธีการ Optimization แบบ Nonlinear Least Square รวมในแบบจำลองทำให้สัญญาณความเร่งในการสั่นสะเทือนของมวลส่วนสปริงรองรับมีค่าสอดคล้องกับผลการทดลองมากขึ้นในการสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์นี้ สามารถใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงในระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัทได้และสามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าความนุ่มนวลในการขับขี่รถยนต์ได้แม่นยำมากขึ้นแต่ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วในการเคลื่อนที่ด้วยนั้นยังไม่ถูกนำมาใช้พิจารณาในครั้งนี้เพื่อให้การจำลองมีความแม่นยำมากขึ้นจึงจำเป็นต้องศึกษาในเรื่องนี้เพิ่มเติมในอนาคตต่อไป

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. I. Ryu, D. O. Kang, S.J Hero, H. J. Yim, and J. I. Jeon, Development of analytical process to reduce side load in strut-type suspension, Journal of Mechanical Science and Technology 24(2010) 351-356
- [2] J. Gardulski and J. Warczek : Investigation on forces in frictional kinematic pairs to assess their influence on shock absorber characteristics. Transport Problems, 2008
- [3] A. Harlecki and H. Kubas : Analysis of the dynamics of passenger cars with MacPherson strut suspension systems in the MSC.ADAMS software environment with taking into account the friction in shock absorbers,2012
- [4] Automotive parts – Telescopic shock absorber for suspension systems. JAPANESE ATOMOBILE STANDARD JASO C602 : 2001.
- [5] A. Bommer, "A Nonlinear Vehicle Model for Comfort Analysis," Master Thesis, 2006.

DRC-7

[6] C.T.T. Geluk, "Vehicle Vibration Comfort: the influence of dry friction in the suspension," Master Thesis, 2005.