

การจำลองระบบโครงสร้างประกอบที่มีการหน่วงสูง หรือซับซ้อนด้วยเทคนิคดัดแปลง

Modified Sub-structuring Techniques for System Modeling of High Damped or Complicated Structural Assemblies

วรเทพ กุศลมานเกียรติ¹ และ จักร จันทลักษณ์²

ศูนย์วิจัยวิศวกรรมคำนวณขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนน พิบูลสงคราม บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทร 66(2)9132500-24 ต่อ 8303 โทรสาร 66(2)5869542

Research Center on Advance Computational Engineering (RACE) Mech. Eng Dept, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
1518 Pibulsongkram Road, Bangsue, Bangkok 10800 Tel. 66(2)9132500-24 ext .8303, Fax. 66(2)5869542
Email-addresses: thep_engineer@yahoo.com¹, chakjoe@hotmail.com²

บทคัดย่อ

วิธีการสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของโครงสร้างประกอบ (Assembly) ทางกลด้วยการทดสอบโมดัล (Modal testing) เป็นวิธีที่นิยมในทางปฏิบัติเนื่องจากได้ข้อมูลที่สอดคล้องกับโครงสร้างจริง อย่างไรก็ตามจากความซับซ้อนของโครงสร้างประกอบ และการเกิดความหน่วง (Damping) ที่บริเวณตำแหน่งเชื่อมต่อชิ้นส่วนย่อย (Parts) เข้าด้วยกัน ทำให้การทดสอบโมดัลต้องใช้หัวเขย่า (Shaker) เพื่อให้โครงสร้างพฤติกรรมที่เด่นชัดออกมา และบางครั้งข้อมูลจากการทดสอบต้องการวิธีการหาเอกลักษณ์ระบบที่ซับซ้อน

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการปรับปรุงเทคนิคแบบ Sub-Structuring อย่างง่าย และใช้การทดสอบโมดัลด้วยวิธีเคาะกระตุ้น (Impact testing) ที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่ความหน่วงไม่มากนัก โดยเทคนิคที่ปรับปรุงนี้จะสามารถให้ผลการดัดแปลงสภาวะขอบเขตโครงสร้าง (Boundary Conditions) ด้วยวิธีการทำนายที่สอดคล้องกับการดัดแปลงโครงสร้างจริงที่มีการหน่วงมากได้ การศึกษาจะเปรียบเทียบเทคนิคที่ปรับปรุงกับวิธีการทางไฟไนต์อีลิเมนต์ เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ และการประยุกต์ใช้เทคนิคดังกล่าวกับการสร้างแบบจำลองโครงสร้างปีกยานบินไร้คนขับที่โครงสร้างประกอบมีการหน่วงสูง โดยใช้ข้อมูลทั้งหมดในการสร้างแบบจำลองจากการทดสอบโมดัล ซึ่งผลการศึกษาก็ได้สามารถทำนายโครงสร้างที่มีอัตราส่วนการหน่วงประมาณ 3 – 5% ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: โครงสร้างย่อย, การทดสอบและวิเคราะห์โมดัล, การจำลองระบบ

Abstract

To construct a dynamic model of an assembled structure, modal testing is widely used due to information obtained from real behavior of an assembled structure. However, since complexity of the assembled structure and damping introduced at connections of parts, these require more complicated testing where a shaker may need to excite the structure behavior. Also testing data is needed to process with complicated system identification techniques.

In this study, a simple modified sub-structuring technique is proposed to implement with impact testing techniques used for lightly damped structures. The modified technique is then capable of dynamic behavior prediction of high damped structures. The study is to compare dynamic behavior between an assembled structures from the modified technique and those from the finite element method to verify the technique. Then the modified technique is implemented to real structures, wing structures of unmanned aircraft vehicle (UAV) where high damping is present. The results showed that it can be predicted well for damping ratio of 3 – 5%.

Keyword: Sub-structuring, Modal Testing and Analysis, System Modeling

1. บทนำ

การศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางกล ที่มีรายละเอียดของการออกแบบที่ซับซ้อน หรือชิ้นงานประกอบที่ส่งผลให้เกิดความหน่วง (Damping) ในโครงสร้างซึ่งตัวแปรการหน่วงนี้ โดยปกติจะทำให้การหาเอกลักษณ์ หรือสร้างแบบจำลองโครงสร้างจากข้อมูลการทดสอบโครงสร้าง (Modal Testing) ทำได้ค่อนข้างยากขึ้น เนื่องจากความเด่นของโหมดการสั่นไม่ชัดเจน [1]วิธีการทำนายพฤติกรรมแบบชิ้นส่วนย่อย (Parts) ในโครงสร้างประกอบ (Assembly) จะทำให้การทดสอบโมดัลในชิ้นส่วนย่อย เพื่อนำข้อมูลทดสอบมาสร้างแบบจำลองการสั่น สามารถทำได้สะดวกและแบบจำลองที่สร้างจากผลการทดสอบของชิ้นส่วนย่อยทั้งหมด สามารถสร้างขึ้นเป็นแบบจำลองโครงสร้างประกอบที่สมบูรณ์ รวมทั้งสามารถนำข้อมูลความหน่วงจากจุดต่อเชื่อมต่างๆ ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างประกอบมาปรับปรุง (updating) แบบจำลองชิ้นส่วนย่อยให้มีความสอดคล้อง กับแบบจำลองโครงสร้างประกอบได้ หรือที่เรียกรวมกันว่า เทคนิค Sub-structuring [1] โดยเทคนิคนี้เคยใช้ในการออกแบบอุปกรณ์รับน้ำหนักบริเวณฐานล้อของเฮลิคอปเตอร์ (Carrier) ที่ต้องเชื่อมต่อกับลำตัว โดยแบบจำลองการสั่นของอุปกรณ์รับน้ำหนักดังกล่าวถูกนำมารวมกับแบบจำลองการสั่นของลำตัวที่ได้จากการทดสอบ เพื่อสร้างแบบจำลองและทำนายลักษณะโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นเมื่อได้ประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน

2. ทฤษฎี

2.1 แบบจำลองโมดัล (Modal model)

ในการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางกลในเชิงโดเมนความถี่ สมการคณิตศาสตร์ที่สามารถนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองโมดัลได้คือ

$$H_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^m \frac{r A_{jk}}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega} \quad (1)$$

โดยคุณลักษณะของระบบหรือตัวแปรโมดัล (Modal Parameters) ซึ่งประกอบด้วยโอเกนเวกเตอร์ (Eigenvector) $r A_{jk}$ โดย r คือลำดับโหมดการสั่น j คือตำแหน่งจุดโครงสร้างที่ตอบสนองและ k คือตำแหน่งจุดโครงสร้างที่กระตุ้น และโอเกนวาเล (Eigenvalues), ω_r, ζ_r หรือความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงตามลำดับ เป็นสิ่งบ่งบอกพฤติกรรมทางกลของโครงสร้าง ซึ่งวิธีที่นำเสนอต่อไปนี้ จะแสดงให้เห็นว่าตัวแปรโมดัล สามารถหาได้จากฟังก์ชันตอบสนองความถี่ (Frequency Response Function, FRF) ของระบบ ที่ได้จากการทดสอบแบบใช้ค้อนกระตุ้นการสั่น (Impact testing) ดังนี้

2.1.1 การหาตัวแปรโมดัล ของโครงสร้างจากข้อมูลผลการทดสอบ

การหาค่าโอเกนเวกเตอร์ โดย Dobson's Method [1] จะพิจารณาแบบที่ค่าความหน่วงน้อย ดังนั้นจาก (1) จะได้

$$H_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^m \frac{r A_{jk}}{\omega_r^2 - \omega^2} \quad (2)$$

โดยค่าฟังก์ชันตอบสนองความถี่ H_{jk} ณ ตำแหน่งความถี่ใดๆ (Ω_ℓ) และค่าความถี่ธรรมชาติ (ω_r) สามารถหาได้จากฟังก์ชันตอบสนองความถี่ที่ได้จากการทดสอบ ดังนั้นจากสมการ (2) สามารถเขียนได้ว่า

$$H_{jk}(\Omega_\ell) = \left\{ (\omega_1^2 - \Omega_\ell^2)^{-1} \quad (\omega_2^2 - \Omega_\ell^2)^{-1} \quad \dots \right\} \begin{Bmatrix} 1 A_{jk} \\ 2 A_{jk} \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (3a)$$

โดยจะทำการเก็บข้อมูลไว้ในหลายๆ ตำแหน่งดังสมการ(3b)

$$\begin{Bmatrix} H_{jk}(\Omega_1) \\ H_{jk}(\Omega_2) \\ \vdots \\ \vdots \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (\omega_1^2 - \Omega_1^2)^{-1} & (\omega_2^2 - \Omega_1^2)^{-1} & \dots \\ (\omega_1^2 - \Omega_2^2)^{-1} & (\omega_2^2 - \Omega_2^2)^{-1} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 A_{jk} \\ 2 A_{jk} \\ \vdots \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (3b)$$

$$\text{หรือ} \quad \{H_{jk}(\Omega)\} = [R] \{A_{jk}\} \quad (3c)$$

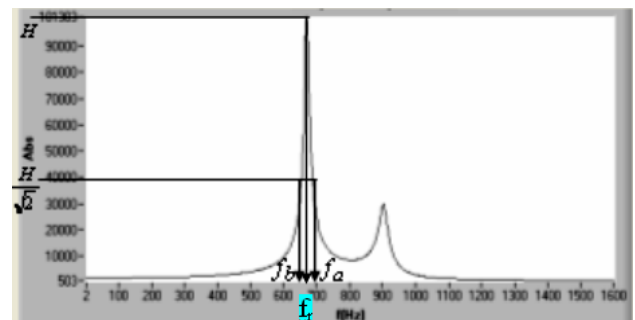
ดังนั้นโอเกนเวกเตอร์ $r A_{jk}$ สามารถหาได้โดย

$$\{A_{jk}\} = [R]^{-1} \{H_{jk}(\Omega)\} \quad (4)$$

2.1.2 การหาค่าอัตราส่วนการหน่วง โดยวิธี Half-power

จากรูปที่ 1 กราฟฟังก์ชันตอบสนองความถี่จะเห็นว่า ความกว้างของยอดกราฟจะสัมพันธ์กับอัตราส่วนการหน่วง และสามารถคำนวณได้ดังสมการ (5)

$$\zeta = \frac{f_a - f_b}{2f_r} \quad (5)$$



รูปที่ 1 การหาค่าอัตราส่วนการหน่วงโดยวิธี Half-power

จากสมการที่ (2) และ (5) สามารถนำมาสร้างเป็นแบบจำลองโมดัลดังแสดงในสมการที่ (1) ได้ ดังนั้น ข้อมูลผลการทดลอง (Modal Testing) สามารถนำไปสู่การหาตัวแปรทางโมดัล และสร้างเป็นแบบจำลองทางกลของโครงสร้างย่อยๆ ได้ ซึ่งทำให้สามารถทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างย่อย เมื่อนำไปทำการดัดแปลงโครงสร้าง เช่น อาจจะเป็นการยึดตรึงหรือประกอบกับโครงสร้างย่อยอื่น เป็นการทำนายถึงพฤติกรรมของโครงสร้างประกอบได้ ดังที่จะกล่าวต่อไป

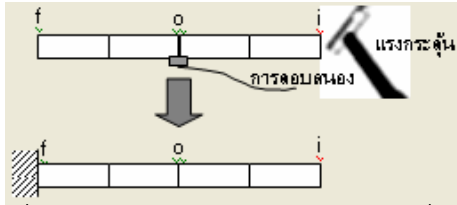
2.2 การปรับปรุงเทคนิค Sub-structuring อย่างง่าย

การทำนายพฤติกรรมพลศาสตร์ของโครงสร้างที่มีจุดต่อหรือการยึดโครงสร้างไว้ในแบบต่างๆ สามารถที่จะสร้างแบบจำลองได้จากการนำข้อมูลทดสอบการสั่นของโครงสร้างที่ยึดแบบอิสระหรือแขวนห้อย

โครงสร้าง เพื่อลดผลกระทบจากความหน่วงที่เกิดกับจุดยึดต่อและทำให้การระบุโหมดการสั่นทำได้ง่ายขึ้น ซึ่งความหน่วงของโครงสร้างที่มีการยึดที่จุดยึดจริงจะสามารถนำมาอัปเดต (Model updating) ในภายหลังได้

2.2.1 การทำนายการปรับปรุงโครงสร้างย่อยแบบยึดตรึง

พิจารณาการปรับปรุงคานโดยการยึดตรึง 1 จุด หรือจุด f ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แนวคิดการทดสอบแบบคานปล่อยอิสระ เพื่อทำนายการปรับปรุงแบบยึดตรึง

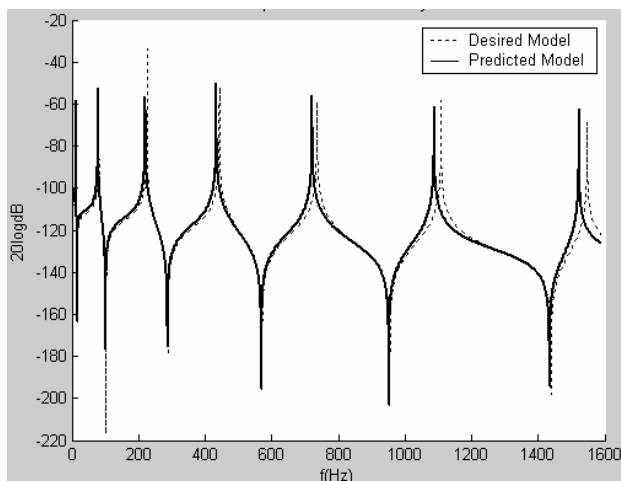
จาก ฟังก์ชันตอบสนองความถี่ $H_{jk} = \frac{x_j}{F_k}$

จากรูปที่ 2 ได้

$$\begin{aligned} x_f &= H_{ff}F_f + H_{fi}F_i = 0 \\ x_o &= H_{of}F_f + H_{oi}F_i \end{aligned} \quad (6)$$

ดังนั้น

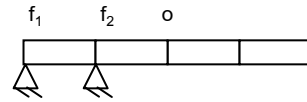
$$H_{oi_modify} = H_{oi} + \left(\frac{-H_{of}H_{fi}}{H_{ff}} \right) \quad (7)$$



รูปที่ 3 เปรียบเทียบการทดสอบการยึดตรึงโดยตรงกับการทำนายโดยใช้ข้อมูลจากคานยึดแบบอิสระ

ซึ่งผลการทดสอบจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Sub-structuring พบว่า การดัดแปลงข้อมูลจากการตอบสนองโครงสร้างกรณียึดแบบอิสระ (Free support) สามารถนำมาทำนายฟังก์ชันตอบสนองความถี่ระบบที่ทำการยึดแบบตรึงได้ (รูปที่ 3)

แต่ปัญหาหนึ่งที่พบในการประยุกต์ใช้วิธีนี้คือ การสร้างสมการฟังก์ชันตอบสนองความถี่ที่ทำการปรับปรุง (H_{modify}) เมื่อมียึดตรึงหลายจุด เนื่องจากเมื่อมีจุดยึดตรึงมากขึ้น สมการ H_{modify} ก็จะมีค่าซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งไม่เหมาะกับการใช้งาน ดังตัวอย่างสมการ (8)



รูปที่ 4 การปรับปรุงโดยยึดตรึงคาน แบบ 2 จุด

$$H_{oi_modify} = \left[H_{oi} - \frac{H_{of1}H_{fi2}T}{H_{f2f1}T + H_{f2f2}} - \frac{H_{fi1}H_{of2}}{H_{f1f2} + H_{f1f1}T} \right] \quad (8)$$

โดย

$$T = \frac{(H_{f1f2}H_{f2i} - H_{f2f2}H_{fi1})}{(H_{f2f1}H_{fi1} - H_{f1f1}H_{f2i})}$$

2.2.2 วิธีการหาฟังก์ชันตอบสนองความถี่สำหรับโครงสร้างยึดตรึงหลายจุด

วิธีการที่จะนำเสนอต่อไปนี้เป็นขั้นตอนในการคำนวณหาฟังก์ชันตอบสนองความถี่แบบยึดตรึงหลายจุด โดยใช้ข้อมูลพฤติกรรมโครงสร้างจากการยึดแบบอิสระ โดยให้มีความเหมาะสมและใช้ปฏิบัติได้สะดวก จากรูปที่ 4 ที่มีการยึดตรึงโครงสร้างที่จุด f_1 และ f_2 สามารถเขียนสมการในรูปของเมทริกซ์ ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} x_{f1} \\ x_{f2} \\ x_o \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{f1f1} & H_{f1f2} & H_{f1fi} \\ H_{f2f1} & H_{f2f2} & H_{f2fi} \\ H_{of1} & H_{of2} & H_{ofi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{f1} \\ F_{f2} \\ F_i \end{Bmatrix} \quad (9a)$$

ดังนั้นพิจารณาสมการสองแถวแรก

$$\begin{Bmatrix} F_{f1} \\ F_{f2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{f1f1} & H_{f1f2} \\ H_{f2f1} & H_{f2f2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{f1fi} \\ H_{f2fi} \end{bmatrix} F_i \quad (9b)$$

หรือเขียนในรูปกะทัดรัดเป็น

$$\begin{Bmatrix} F_{f1} \\ F_{f2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \end{Bmatrix} F_i \quad (9c)$$

ฉะนั้นแทนสมการ (9c) กลับในสมการ (9a) แถวสามได้เป็น

$$x_o = \begin{bmatrix} H_{of1} & H_{of2} & H_{ofi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ 1 \end{Bmatrix} F_i \quad (9d)$$

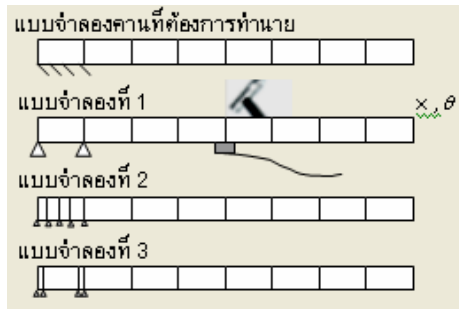
$$\therefore H_{modify} = \frac{x_o}{F_i} = \begin{bmatrix} H_{of1} & H_{of2} & H_{ofi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (9e)$$

โดยสมการ (9e) และ (8) ให้ผลที่เหมือนกัน แต่สามารถเขียนเป็นอัลกอริทึมใช้ในทางปฏิบัติได้สะดวกกว่า

2.2.3 ผลกระทบของการประยุกต์กับโครงสร้างคานที่มีขั้วอิสระเชิงมุม (rotational degree of freedom)

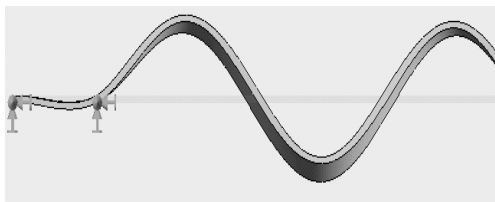
ในโครงสร้างผนังบางเช่น คาน ที่ต้องการยึดตรึงปลายด้านหนึ่งไว้ การเลือกจุดยึดเป็นเพียงการเคลื่อนที่แนวขวางคานเพียงจุดเดียว จะไม่สามารถจำลองการยึดตรึงเสมือนจริงได้ หรือการยึดตรึงเพียงสองจุด ก็สามารถมีผลกระทบจากความแข็งดิ่งสปริงโครงสร้าง จากการให้ตัวเชิงมุมของโครงสร้างผนังบางได้ ซึ่งปกติผลจากการทดสอบโครงสร้างจะไม่ง่ายต่อการตรวจวัดการสั่นสะเทือนเชิงมุม ซึ่งในการศึกษานี้จะ

เน้นเทคนิคในการยึดตรึงปลายดิ่งแสดงการศึกษาในแบบจำลองตามรูปที่ 5

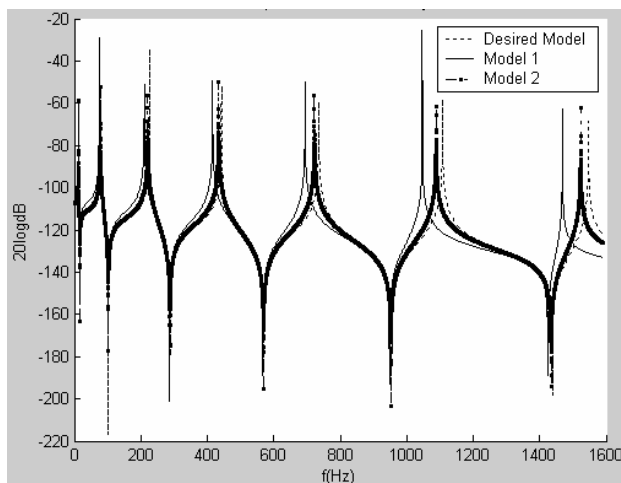


รูปที่ 5 แบบจำลองคานาที่ต้องการทำนายและแบบจำลองที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Sub-structuring เพื่อเปรียบเทียบ

ในแต่ละโหนดที่แบ่งบนโครงสร้างแบบคานา นอกจากจะมีผลตอบสนองในแนวขวาง (Transverse), x แล้ว ยังมีการเคลื่อนที่อิสระเชิงมุม, θ ของคานา โดยแบบจำลองที่ 1 การยึดตรึงจะเกิดเฉพาะในแนวขวางเท่านั้น (รูปที่ 5) ผลที่ได้จึงยังไม่ใกล้เคียงกับการยึดแบบจำลองคานาที่ต้องการทำนายหรือใช้ผลการตอบสนองจากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อเปรียบเทียบ เนื่องจากผลของการตัดตัวที่เกิดขึ้น จึงทำการปรับปรุงแบบจำลองเพื่อยึดตรึงเป็นแบบจำลองที่ 2 จึงใกล้เคียงมากขึ้น (รูปที่ 7)



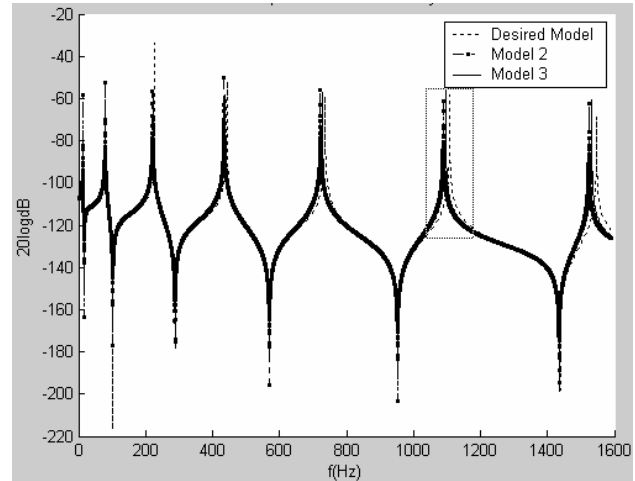
รูปที่ 6 การตัดตัวเชิงมุมที่เกิดขึ้นหากทำการจุดยึดตรึงจำลองจากไฟไนต์อีลิเมนต์



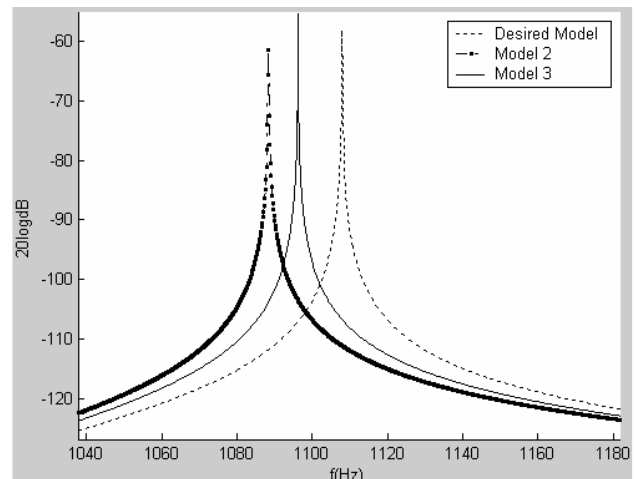
รูปที่ 7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปแบบการยึดตรึงระหว่างแบบจำลองที่ 1 และ 2 กับแบบจำลองยึดตรึงตามทฤษฎี

จะเห็นว่าหากมีการแบ่งจุดให้ละเอียดมากขึ้น การยึดตรึงแม้จะอยู่ในแนวขวางก็สามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการตัดตัวเชิงมุมได้ ดังนั้นแบบจำลองที่ 3 จึงถูกสร้างขึ้นเพื่อทดสอบและยืนยันสมมติฐานนี้ โดยทำการแบ่งคานาให้โหนดมีความละเอียดมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณ

จุดยึดเดิมของแบบจำลองที่ 1 และเอาโหนดที่ตำแหน่งกึ่งกลางออก (รูปที่ 5) เพราะสังเกตว่าการยึดโหนดในแนวขวางเพียงเท่านั้นก็เพียงพอต่อการลดผลกระทบจากความแข็งตึงสปริงเชิงมุมได้ ซึ่งผลการจำลองเชิงตัวเลขสามารถยืนยันแนวคิดและสมมติฐานนี้ได้เป็นอย่างดี (รูปที่ 8)



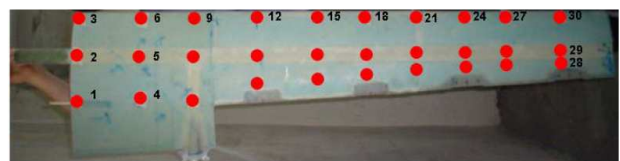
รูปที่ 8-a เปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปแบบการยึดตรึง ระหว่างแบบจำลองที่ 2 และ 3



รูปที่ 8-b ขยายรูป 8-a ตรงบริเวณเส้นประสี่เหลี่ยมเพื่อให้เห็นชัดเจนมากขึ้น

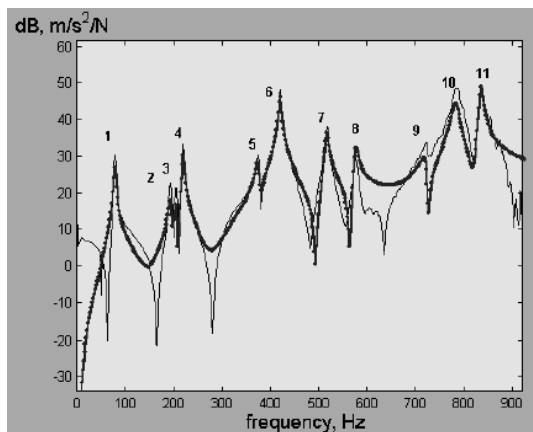
3. การประยุกต์วิธีการตัดแปลงโครงสร้างย่อยสำหรับปีกเครื่องบินไร้คนขับ (UAV)

การทดลองนี้ ได้นำวิธีการตัดแปลงโครงสร้างย่อยตามที่ได้กล่าวมาแล้ว มาใช้กับปีกเครื่องบินไร้คนขับ (UAV) โดยใช้ผลการทดสอบจริง (แบบยึดโครงสร้างด้วยวิธีแขวนห้อยอิสระ) ของปีกเครื่องบิน มาสร้างเป็นแบบจำลองโมดัลตามสมการ (1) ซึ่งผลที่ได้จะนำไปทำนายผลการปรับปรุงโครงสร้างแบบยึดตรึงในส่วนโคนปีกต่อไป โดยโครงสร้างปีกทำจากไฟเบอร์ร่วมกับเรซินและมีโฟมเป็นไส้กลาง

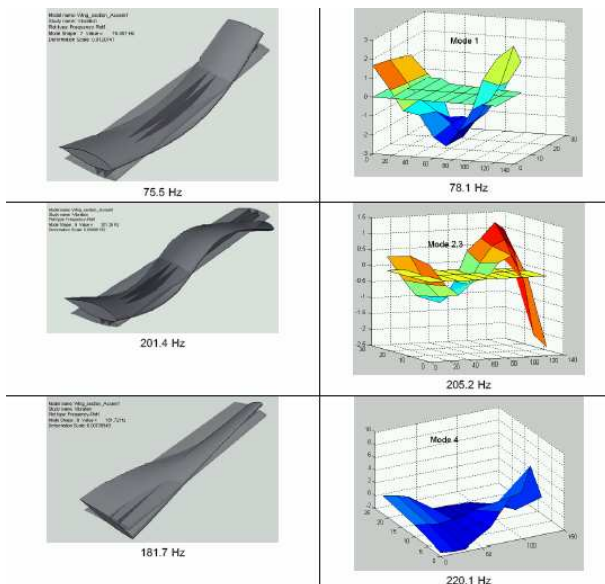


รูปที่ 9 โครงสร้างปีกเครื่องบินที่ทำการแบ่งจุดวัดสัญญาณทั้ง 30 จุดวัด

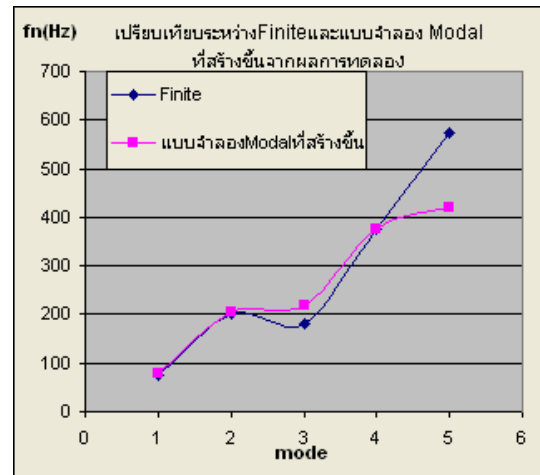
จากข้อมูลการทดสอบ สามารถหาไอเกนเวกเตอร์ และไอเกนวาเล (ความถี่ธรรมชาติและ อัตราส่วนความหน่วง) ณ โหมดต่างๆ (สมการ (3) – (5)) นั่นคือการได้สมการแบบจำลองฟังก์ชันตอบสนองความถี่ของปีกเครื่องบิน ซึ่งรูปที่ 10 และ 11-a,b สามารถยืนยันความถูกต้องแบบจำลองโมดัลที่สร้างขึ้นได้เป็นอย่างดี โดยในรูปที่ 10 เส้นบางคือ ฟังก์ชันตอบสนองความถี่ (ณ จุดวัดและกระตุ้นที่จุด 1, H_{11}) ที่ได้จากการทดลอง มีความใกล้เคียงกับเส้นทึบซึ่งได้จากแบบจำลองโมดัลที่สร้างขึ้นจากวิธี Dobson ที่มีการดัดแปลง ส่วนรูปที่ 11-a,b นอกจากจะเป็นการยืนยันความถูกต้อง (จากรูปร่างการสั่นที่เหมือนกันดังรูป 11-a) แล้ว ข้อมูลจากแบบจำลองโมดัล ยังช่วยให้การปรับปรุง Finite Element Analysis (FEA) model มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นด้วย



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบ H_{11} ระหว่างการได้จากการทดลอง (เส้นบาง) และแบบจำลองโมดัลที่สร้างขึ้น (เส้นทึบ)



รูปที่ 11-a เปรียบเทียบรูปร่างการสั่นจากแบบจำลอง ไฟไนต์อีลิเมนต์และแบบจำลองโมดัลที่สร้างจากผลการทดสอบ

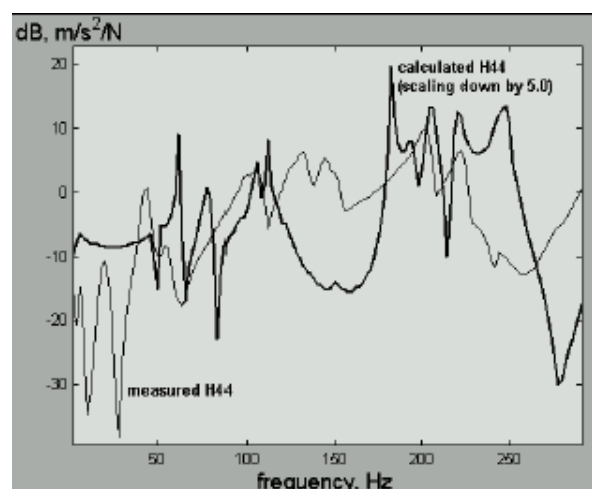


รูปที่ 11-b เปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติจากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ และ แบบจำลองโมดัลที่สร้างจากผลการทดสอบ

ในการทดลองต่อไปจะใช้วิธี Substructuring ทำนายการยึดตรึงโคนปีก โดยใช้ข้อมูลจากแบบจำลองที่สร้างจากผลการทดสอบยึดอิสระเดิม ณ จุดยึดตรึงสองจุด คือจุดที่ 1 และ 2 ตามรูปที่ 9 เปรียบเทียบกับผลการทดสอบเมื่อทำการยึดตรึงปีกจริงดังรูปที่ 12

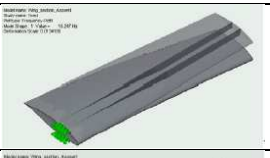
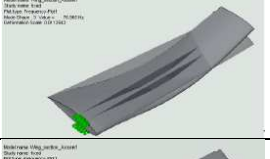
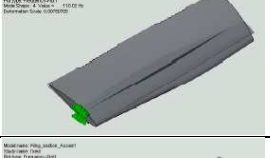
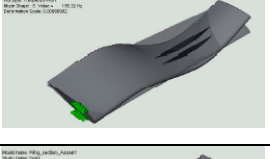
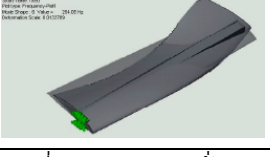


รูปที่ 12 การยึดลำตัวกับปีกเครื่องบิน สำหรับการทดสอบจริงเพื่อเปรียบเทียบผลกับวิธี Sub-structuring

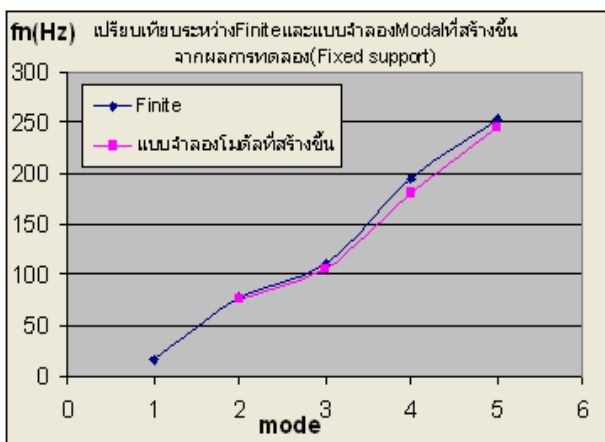


รูปที่ 13 เปรียบเทียบผลจากการณีปีก UAV ที่ใช้หลักการ Sub-structuring (คำนวณ) เปรียบเทียบกับวิธีการยึดปีกจริง (โครงสร้างประกอบ)

จากรูปที่ 13 ลักษณะของการเกิดโหมดการสั่นจะมีรูปแบบคล้ายกัน เพียงแต่ค่าความถี่ธรรมชาติไม่ถูกต้องทีเดียวนัก เนื่องจากไม่ได้รวมพลศาสตร์ของส่วนลำตัวเข้าไว้ด้วย แต่สามารถนำมาอัปเดตภายหลังด้วยเทคนิคอื่นๆ ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ทำการยึดตรึงโคนปีกจะพบว่า ค่าความถี่ธรรมชาติค่อนข้างให้ผลสอดคล้องกับการทำนายด้วยวิธี Sub-structuring เป็นอย่างดี

ลักษณะmode shape	ค่าความถี่ธรรมชาติ
	FE model : 15.3 Hz Predict from modified model : -
	FE model : 77 Hz Predict from modified model : 76.31 Hz
	FE model : 110 Hz Predict from modified model : 106.57 Hz
	FE model : 195 Hz Predict from modified model : 192.98 Hz
	FE model : 254 Hz Predict from modified model : 246.05 Hz

รูปที่ 14-a รูปร่างการสั่นและค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองปีกที่ทำการยึดตรึงโคนของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ และค่าความถี่ธรรมชาติที่ทำนายได้ จากแบบจำลองโมดัลที่สร้างขึ้น



รูปที่ 14-b กราฟเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองปีกเมื่อทำการยึดตรึงโคนปีกระหว่างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์กับแบบจำลองโมดัลที่สร้างขึ้น

4. สรุป

4.1. ข้อมูลจากผลการทดสอบจริงแบบยึดโครงสร้างอิสระ (Free support) ของโครงสร้างย่อย สามารถนำมาสร้างแบบจำลองโมดัล ซึ่งเป็นสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมการสั่นของโครงสร้างในเชิงความถี่ได้โดยมีการระบุโหมดได้อย่างชัดเจน

4.2. แบบจำลองโมดัลแบบยึดโครงสร้างอิสระ สามารถนำมาใช้ ทำนายผลตอบสนองเชิงความถี่หรือฟังก์ชันตอบสนองความถี่ของโครงสร้างเมื่อทำการยึดตรึง (Fixed support) ได้ แต่การสร้างแบบจำลองนี้ต้องคำนึงถึงผลกระทบที่เกิดจากการตัดตัวเชิงมุมของโครงสร้างผนังบางด้วย เนื่องจากข้อมูลที่ได้มาจากการวัดจะเป็นข้อมูลที่มาจากการสั่นไหวในแนวขวางของคาน หากทำการยึดตรึงเฉพาะจุดยึดมีกำหนด วิธี Sub-structuring อาจผิดพลาดได้ เนื่องจากผลกระทบจากการตัดตัวยังคงอยู่ ดังนั้นจึงควรแบ่งจุดยึดเพิ่มให้ใกล้เคียงกับจุดที่ต้องการยึดเดิมด้วย เพื่อลดผลกระทบดังกล่าว (Bending)

4.3. ผลการทดสอบยืนยันให้เห็นถึงวิธีการ Sub-structuring ที่ดัดแปลงนี้สามารถนำมาใช้กับโครงสร้างที่มีความหนาสูงเช่นโครงสร้างปีกเครื่องบินไร้คนขับได้ หรือเป็นโครงสร้างที่มีค่าอัตราส่วนความหนาในช่วง 3 – 5 % (โครงสร้างทางกลที่มีจุดต่อเชื่อม) [1]

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) และสำนักงานวิจัยและพัฒนาการทหารกลาโหม(สวพ.ภท.)ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยชิ้นนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D.J. Ewins , "Modal Testing: Theory,Practice and Application", 2nd Edition, Academic Press, 2001
- [2] Anto'nio Panlo Vale Urgueira, 'DYNAMICS ANALYSIS OF COUPLED STRUCTURES USING EXPERIMENTAL DATA', a Thesis submitted to College of Science Technology and Medicine London, October 1989
- [3] Svend Gad , Henrik Herlufsen , Hans Konstantin-Hansen, 'Application Note: How to Determine the Modal parameters of Simple Structures', Brüel & Kjaer ,Denmark