

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและรอยแตกร้าวบนเฟือง

A Study of the Relationship between Vibration Signal and Gear Crack

สุรศักดิ์ คคมิ¹ ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ²

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการบำรุงรักษาเครื่องจักรกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร 0-2218-6644 โทรสาร 0-2252-2889 E-mail: skokmi114@hotmail.com¹, Chairote.K@chula.ac.th²

Surasak Kokmi¹ Chairote Kunpanitchakit²

Machinery Maintenance Technology Research Unit Cell, Mechanical Engineering Department,

Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 254 Payathai Rd, Pathumwan, Bangkok 10330 Thailand

Tel: 0-2218-6644 Fax: 0-2252-2889 E-mail: skokmi114@hotmail.com¹, Chairote.K@chula.ac.th²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับความยาวรอยแตกร้าวอันเนื่องมาจากความล้าที่บริเวณฐานของฟันเฟือง การทดลองกระทำโดยการสร้างรอยแตกร้าวที่ระดับความยาวต่างๆ 4 ระดับด้วยเครื่องทดสอบความล้า สัญญาณการสั่นสะเทือนที่นำมาวิเคราะห์อยู่ในรูปแบบของสัญญาณบนโดเมนเวลา สเปกตรัม และเซปทรัลริ่ม โดยทำการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการต่าง ๆ กันดังนี้ การเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ และการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ

ผลการวิจัยพบว่าการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา Kurtosis และ Crest Factor มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของรอยแตกร้าว ในขณะที่ค่า RMS มีขนาดที่ค่อนข้างคงที่ การเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะช่วยให้สามารถสังเกตเห็นลักษณะคาบการชนกันของเฟืองที่ชัดเจน สามารถระบุตำแหน่งฟันซี่ที่แตกร้าวได้จากการสังเกตพบพัลส์ ณ ช่วงเวลาที่ฟันซี่ที่แตกร้าวชนกันสำหรับการวัดสัญญาณในทิศทางเดียวกับการชนกันของเฟือง การวิเคราะห์ชุดแถบความถี่ข้างในสัญญาณสเปกตรัมพบว่าเมื่อปรากฏรอยแตกร้าวแล้วจำนวนฮาร์โมนิกของชุดแถบความถี่ข้างในเนื่องจากความถี่เฟืองที่แตกร้าวทางด้านความถี่ต่ำกว่า 1xGMF เพิ่มขึ้น และฮาร์โมนิกที่ตรงกับความถี่ธรรมชาติมีแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของรอยแตกร้าวเป็นอย่างมาก ผลของสัญญาณเซปทรัลริ่มพบว่าแกมมิตูที่คิวเฟร้นซีตรงกับคาบการหมุนของเฟืองที่แตกร้าว (1/P) มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งที่ระดับความยาวรอยแตกร้าว 2.5 มม. แล้วค่าแกมมิตูจึงลดลงเล็กน้อย การเก็บสัญญาณด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่นอกจากช่วยให้สามารถแยกแยะชุดแถบความถี่ข้างในได้ชัดเจนแล้ว ยังให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าแกมมิตูของสัญญาณเซปทรัลริ่มที่ชัดเจนที่สุด

Abstract

This research dealt with gear crack diagnosis based on vibration signal analysis. The relationship of vibration signal and crack length was analyzed by means of time domain, spectral and cepstral analysis. Vibration signal was recorded by using spectrum averaging, zoom processing, and synchronous time averaging techniques. One cracked tooth was prepared on brass pinions in 4 different lengths by using a dynamic servo fatigue testing machine.

The study of the relationship between time domain signal and crack length shows that the magnitude of Kurtosis and Crest Factor increase with crack evolution while the RMS value does not change with crack evolution. The tooth meshing period can be clearly seen in the synchronous time averaging signal. The cracked tooth and the shock pulse around cracked tooth meshing period can be identified in the direction of tooth contact. It is found from the spectral analysis that number of lower sidebands of the pinion speed around 1xGMF increase when crack exist. Harmonics of pinion speed lower sideband which resemble with any natural frequencies of test bed greatly increase with crack length. In case of cepstral analysis, gammitude of 1/P increases with crack length until the crack length reaches 2.5 mm and then it slightly decreases. The zoom processing of the signal enhances the separation of each harmonics of sideband. The values of the rate of cepstral gammitude obtained from this method change greater than the signal from other methods.

1. บทนำ

ความเสียหายที่มักเกิดขึ้นกับชุดเฟืองที่รับภาระมากเกินไปเกินกำหนด คือความเสียหายเนื่องจากความล้าของฟันเฟืองเป็นผลมาจากความเค้นดัดที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันมีขนาดมากเกินไปจนเกินกว่าขีดจำกัดความทนทาน (Endurance Limit) ของวัสดุที่ใช้ผลิตเฟืองตัวนั้น ความแข็งแรงที่น้อยกว่าของฟันซี่ที่มีรอยแตกหรือเป็นสาเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการสั่นสะเทือน งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและความยาวรอยแตกหรือเป็นสาเหตุด้วยการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา สัญญาณสเปกตรัม และสัญญาณแซปส์ตรัม โดยใช้วิธีการเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนดังต่อไปนี้ การเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ (Spectrum Averaging) การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ (Synchronous Time Averaging) และกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ (Zoom Processing)

2. การสั่นสะเทือนของชุดเฟือง

ชุดเฟืองที่นำมาใช้งานจริงมีโปรไฟล์ของฟันเฟืองต่างไปจากเส้นโค้งอินโวลูทเล็กน้อย ประกอบกับเมื่อมีการกระทำจะมีการเสียรูปแบบอีลาสติก (Elastic Deformation) การเบี่ยงเบนของฟันผิวไปจากโค้งอินโวลูทส่งผลให้แรงที่ส่งผ่านไม่คงที่ซึ่งเรียกว่าความคลาดเคลื่อนการส่งผ่านการเคลื่อนที่สถิต (Static Transmission Error) [2] อันเป็นที่มาหลักของการสั่นสะเทือนในชุดเฟือง ซึ่งสามารถเขียนแทนความคลาดเคลื่อนการส่งผ่านการเคลื่อนที่สถิตของคู่เฟืองได้ด้วยอนุกรมเชิงซ้อนดังต่อไปนี้

$$s(t) = \sum_{i=0}^{\infty} c_i \cdot e^{j(2\pi i(T_1 f_p) t)} + \sum_{n=0, n \neq T_1}^{\infty} c_n \cdot e^{j(2\pi n f_p t + \alpha_n)} + \sum_{m=0, m \neq T_2}^{\infty} c_m \cdot e^{j(2\pi m f_p (\frac{T_1}{T_2}) t + \beta_m)} \quad (1)$$

โดยที่ c_i, c_m, c_n คือแอมพลิจูดของความคลาดเคลื่อนการส่งผ่านการเคลื่อนที่สถิต f_p คือความถี่ของเฟืองขับ T_1, T_2 คือจำนวนซี่ฟันของเฟืองขับและเฟืองตาม $T_1 f_p$ คือความถี่การขบกันของเฟือง (Gear Meshing Frequency, GMF) และ α_n, β_m คือมุมเฟส ในพจน์แรกคือการสั่นสะเทือนด้วยความถี่ GMF และฮาร์โมนิก มีที่มาจากทั้งเฟืองขับและเฟืองตามเรียกว่าสัญญาณความคลาดเคลื่อนแบบฮาร์โมนิก (Harmonic Error Signal) พจน์ที่ 2 และ 3 เรียกว่าสัญญาณความคลาดเคลื่อนส่วนที่เหลือ (Residual Error Signal) เนื่องจากเฟืองขับและเฟืองตาม Mark [2] ได้เสนอว่าความคลาดเคลื่อนแบบฮาร์โมนิกมีสาเหตุมาจากการเสียรูปแบบอีลาสติกของฟันเฟืองและความเบี่ยงเบนพื้นผิวฟันเฟืองที่ต่างไปจากโค้งอินโวลูทสมบูร์น ความคลาดเคลื่อนส่วนที่เหลือที่เกิดขึ้น ณ ฮาร์โมนิกของความถี่การหมุนของเฟืองขับและเฟืองตามมีสาเหตุมาจากการเบี่ยงเบนของผิวฟันเฟืองแบบพลศาสตร์เช่น ฟันสึกหรอ ฟันแตกร้าว ระยะพิตช์ไม่สม่ำเสมอ เป็นต้น

Wang และ McFadden [3] เสนอว่าความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ของเฟือง (Gear Motion Error) คือส่วนจริงของความคลาดเคลื่อนการส่งผ่านการเคลื่อนที่สถิตสามารถเขียนแทนได้ด้วย

อนุกรมโคซายน์อนันต์ ถ้าสมมติให้เฟืองมีระยะพิตช์เท่ากันทุกซี่ฟัน และมีความคลาดเคลื่อนของโปรไฟล์เบี่ยงเบนไปจากโค้งอินโวลูทเท่ากันทุกซี่ฟัน หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่และรับภาระคงที่ สามารถแทนการสั่นสะเทือนของเฟืองด้วยสมการความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ของเฟืองได้ดังนี้

$$x(t) = \sum_{m=0}^M X_m \cdot \cos(2\pi m T f_p t + \phi_m) \quad (2)$$

โดยที่ X_m คือแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนฮาร์โมนิกที่ m T คือจำนวนซี่ฟันเฟือง f_p คือความถี่ในการหมุนของเฟือง ϕ_m คือมุมเฟส

เมื่อสมมติให้ฟันเฟืองเกิดความบกพร่องขึ้น เช่น ฟันของเฟืองขับมีรอยแตกร้าวเนื่องจากความล้าซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงของฟันซี่นั้น ทำให้การสั่นสะเทือนของชุดเฟืองเปลี่ยนแปลงไปในรูปของการมอดูเลตทางแอมพลิจูดและความถี่ (Amplitude and Phase Modulation) ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$y(t) = \sum_{m=0}^M X_m (1 + a_m(t)) \cdot \cos(2\pi m T f_p t + \phi_m + b_m(t)) \quad (3)$$

โดยที่ $a_m(t)$ และ $b_m(t)$ คือฟังก์ชันมอดูเลตทางแอมพลิจูดและความถี่

$$a_m(t) = \sum_{n=0}^N A_{mn} \cdot \cos(2\pi n f_p t + \alpha_{mn}) \quad (4)$$

$$b_m(t) = \sum_{n=0}^N B_{mn} \cdot \cos(2\pi n f_p t + \beta_{mn}) \quad (5)$$

โดยที่ A_{mn} และ B_{mn} คือขนาดของการมอดูเลตทางแอมพลิจูดและความถี่ตามลำดับ α_{mn} และ β_{mn} คือมุมเฟส

ฟังก์ชันมอดูเลตทางแอมพลิจูดในสมการที่ (4) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลเชิงซ้อนโดยอาศัยสมการของออยเลอร์ [4] ได้ดังนี้

$$a_m(t) = \sum_{n=0}^N [X_{mn} \cdot e^{j(2\pi n f_p) t} + X_{mn}^* \cdot e^{-j(2\pi n f_p) t}] \quad (6)$$

$$\text{โดยที่ } X_{mn} = \frac{A_{mn}}{2} \cdot e^{j\alpha_{mn}} \text{ และ } X_{mn}^* = \frac{A_{mn}}{2} \cdot e^{-j\alpha_{mn}} \quad (7)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (3) และ (6) เฉพาะกรณีการมอดูเลตทางแอมพลิจูดด้วยฟังก์ชันโคซายน์เพียงฟังก์ชันเดียวบนโดเมนความถี่จะปรากฏเป็นแถบความถี่ข้าง (Sideband) 1 คู่ที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ X_{mn} และ X_{mn}^* รอบความถี่ GMF ($T f_p$) โดยห่างจากความถี่ GMF เท่ากับความถี่ f_p ถ้าขนาดของการมอดูเลตทางแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างสูงขึ้นด้วย ในขณะที่การมอดูเลตทางความถี่ถึงแม้ว่ามีฟังก์ชันมอดูเลตเพียงฟังก์ชันเดียวก็จะปรากฏแถบความถี่ข้างมากกว่า 1 คู่ ดังนั้นถ้าขนาดของการมอดูเลตทางความถี่เพิ่มขึ้นนอกจากจะทำให้ชุดแถบความถี่ข้างมีแอมพลิจูดสูงขึ้นแล้วยังส่งผลให้จำนวนฮาร์โมนิกของชุดแถบความถี่ข้างเพิ่มขึ้นด้วย

3. วิธีการเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือน

3.1 การเจ็บบนโดเมนความถี่

หลักการเก็บสัญญาณด้วยการเจ็บบนโดเมนความถี่เริ่มจากสัญญาณเข้าแบบแอนะล็อกที่รับมาจากตัวตรวจรู้แบบความเร่งและเครื่องขยายประจุถูกกรองผ่านความถี่ต่ำด้วยตัวกรองต่อต้านการผันกลับ (Antialiasing Filter) ซึ่งมีความถี่ตัดออกเท่ากับความถี่สูงสุดที่ต้องการวิเคราะห์ จากนั้นถูกแปลงให้เป็นสัญญาณแบบดิจิตอลด้วยความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลเป็น 2.56 เท่าของความถี่สูงสุด แล้วนำข้อมูลสัญญาณบนโดเมนเวลาแบบดิจิตอลเก็บในหน่วยความจำ

ก่อนที่สัญญาณบนโดเมนเวลาจะถูกแปลงแบบ FFT (Fast Fourier Transform) ต้องคูณด้วยฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (Weighting Function) เพื่อลดการรั่วเนื่องจากการกรองสัญญาณ (Filter Leakage) ป้องกันไม่ให้ปรากฏยอดสเปกตรัมที่ความถี่อื่นเพิ่มขึ้นมา ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักที่นิยมใช้ได้แก่ ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม ฟังก์ชันแฮนนิ่ง ฟังก์ชันไกเซอร์-เบสเซล และฟังก์ชันแฟลต-ทอป ซึ่งการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับประเภทสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์ เมื่อทำการแปลงแบบ FFT แล้วสัญญาณสเปกตรัมที่ได้จะถูกทำให้อยู่ในรูปของออโตสเปกตรัม (Autospectrum, G_{xx}) โดยการนำสเปกตรัมมายกกำลังสองแบบเชิงซ้อนเพื่อให้ได้มุมเฟสที่เท่ากับศูนย์ แล้วจึงเก็บสัญญาณออโตสเปกตรัมที่ได้ไว้ในหน่วยความจำเพื่อรอสัญญาณชุดต่อไปที่จะเอามาเฉลี่ยกัน การเจ็บบนโดเมนความถี่ช่วยลดความไม่แน่นอนของสเปกตรัมและปัญหาที่เกิดจากการใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักอื่นที่ไม่ใช่ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมซึ่งทำให้ข้อมูลในช่วงต้นและช่วงปลายคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง การเฉลี่ยสัญญาณนิยมเก็บสัญญาณชุดต่อไปให้เลื่อมกับสัญญาณชุดก่อนหน้ามากกว่า 66.67 % เพื่อลดระยะเวลาเก็บสัญญาณและการถ่วงน้ำหนักของสัญญาณออโตสเปกตรัมจะเท่ากันตลอดช่วงเวลาที่เกิดขึ้นสัญญาณ

3.2 กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่

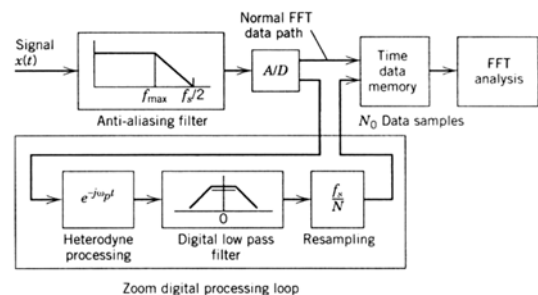
เนื่องจากระยะห่างระหว่างเส้นสเปกตรัม (Δf) แต่ละเส้นเป็นตัวกำหนดความละเอียดของโดเมนความถี่ ถ้าแต่ละองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์อยู่ห่างกันน้อยกว่า 4 เส้นสเปกตรัม จำเป็นต้องขยายความละเอียดของโดเมนความถี่โดยที่สามารถรักษาให้ความถี่สูงสุดคงเดิม ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการเพิ่มขนาดของช่วงเวลาที่ใช้เก็บข้อมูลให้นานขึ้นกว่าเดิมเป็นจำนวนเท่าที่หารลงตัว (N) ในขณะที่ใช้ความถี่สุ่มตัวอย่างข้อมูล (f_s) เท่าเดิม ดังนั้นจะได้ระยะห่างระหว่างเส้นสเปกตรัมที่ปรับปรุงแล้ว (Δf_n) ดังต่อไปนี้

$$\Delta f_n = \frac{f_s}{N_r} = \frac{f_s}{NN_0} = \frac{\Delta f}{N} \quad (8)$$

โดยที่ N_0 คือ จำนวนจุดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับกรณีปกติ (Base Band Analysis) ซึ่งมักมีจำนวนจุดข้อมูล 1024 หรือ 2048 จุด ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นสเปกตรัมที่เลือกใช้ N_r คือ จำนวนจุดข้อมูลทั้งหมดที่ใช้เก็บสัญญาณ และ $N = 2^n$ ($n=1, 2, 3, \dots$)

กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ที่นิยมใช้คือวิธีการเลื่อนความถี่ (Frequency Shift Method) หรือ Heterodyning

Method [4] ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีขั้นตอนเพิ่มขึ้นจากการเจ็บบนโดเมนความถี่แบบธรรมดา คือข้อมูลสัญญาณบนโดเมนเวลาแบบดิจิตอลจะถูกนำมาคูณด้วยฟังก์ชัน Heterodyning ($e^{-j\omega_p t}$) โดยที่ $\omega_p = 2\pi f_p$, f_p คือความถี่ที่อยู่กึ่งกลางช่วงความถี่ที่ต้องการขยายความละเอียดจึงเรียก f_p นี้ว่า ความถี่กึ่งกลาง (Center Frequency) การคูณกันบนโดเมนเวลาทำให้สเปกตรัมเลื่อนไปทางซ้าย f_p Hz จากนั้นสัญญาณถูกกรองด้วยตัวกรองผ่านความถี่ต่ำแบบดิจิตอลเพื่อให้ได้เฉพาะช่วงความถี่ที่ต้องการขยายความละเอียด แล้วจึงนำสัญญาณมาสุ่มตัวอย่างข้อมูลอีกครั้งด้วยการเอาข้อมูลหนึ่งจุดจากทุกๆ N จุดมาเก็บไว้ในหน่วยความจำเวลาเพื่อนำไปแปลงแบบ FFT ต่อไป



รูปที่ 1 การขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ด้วยวิธีเลื่อนความถี่

ข้อดีของการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ด้วยวิธีนี้คือสามารถขยายความละเอียดได้มากโดยที่ยังสามารถทำการวิเคราะห์ในช่วงเวลาจริง (Real Time) ข้อเสียคือหน่วยความจำเวลาไม่ได้เก็บสัญญาณดั้งเดิมไว้ และยังพบว่าความคลาดเคลื่อนต่างๆในการแปลงสัญญาณสะสมอยู่ที่บริเวณความถี่กึ่งกลาง จึงควรตั้งค่าให้ f_p อยู่ห่างออกไปจากบริเวณความถี่ที่ต้องการวิเคราะห์

3.3 การเจ็บบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ

การเก็บสัญญาณด้วยวิธีนี้จะเริ่มเก็บข้อมูลเมื่อได้รับสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นตัวทริกเกอร์ (Trigger) จากแทกโคมิเตอร์ (Tachometer) แบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแสงอินฟราเรด ซึ่งจะสร้างพัลส์เมื่อการสะท้อนกลับของคลื่นเปลี่ยนแปลงไป ณ บริเวณร่องลิ่มหรือแผ่นสะท้อนแสงที่อยู่บนเพลลาของเครื่องจักรที่ต้องการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน การเริ่มเก็บสัญญาณแต่ละครั้งจึงสามารถเกิดขึ้นที่ตำแหน่งการหมุนเดียวกันได้ เมื่อเก็บสัญญาณครบทุกจุดข้อมูลแล้วเครื่องวิเคราะห์จะหยุดรอสัญญาณพัลส์ครั้งต่อไปเพื่อเริ่มเก็บสัญญาณอีกครั้ง สัญญาณบนโดเมนเวลาทีเก็บเพิ่มแต่ละครั้งจะถูกนำมาเฉลี่ยกับสัญญาณชุดเดิมแล้วจึงนำผลที่ได้ไปแปลงแบบ FFT ต่อไป จำนวนชุดสัญญาณที่นำมาเฉลี่ยกันมีผลต่อความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน ถ้าสมมติให้มีจำนวนชุดสัญญาณทั้งหมด N_A ชุดจะทำให้สัญญาณรบกวนบนโดเมนเวลาที่มีขนาดลดลงเป็น $1/\sqrt{N_A}$ เท่าของสัญญาณบนโดเมนเวลาเพียงชุดเดียว ในขณะที่สัญญาณรบกวนในสัญญาณสเปกตรัมซึ่งเป็นแบบออโตสเปกตรัมจะมีขนาดลดลงเป็น $1/N_A$ เท่า ซึ่งสัญญาณรบกวนนี้เป็นได้ทั้งสัญญาณแบบสุ่มและสัญญาณแบบคาบที่มีความถี่ไม่สัมพันธ์กับความถี่ในการหมุนของเพลลาที่ติดตั้งแทกโคมิเตอร์

4. การทดลองและการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน

4.1 การจำลองรอยแตกร้าวบนพื้นเฟือง

เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อระดับความยาวรอยแตกร้าวมากขึ้นและสามารถทดลองวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ระดับความยาวรอยแตกร้าวหนึ่งๆ ได้หลายครั้ง แต่เนื่องจากความจำกัดของชุดทดลองที่มีกำลังน้อยจึงสร้างให้ชุดเฟืองมีระดับความยาวรอยแตกร้าวต่างกันก่อนการทดลองโดยอาศัยเครื่องทดสอบความล้า (Dynamic Servo Fatigue Testing Machine) สร้างรอยแตกร้าวขึ้นที่บริเวณโคนฟันของเฟืองขับจำนวน 1 ชุดต่อเฟือง 1 ตัว โดยชุดเฟืองที่ใช้ทดลองเป็นเฟืองตรงโมดูล 4 มม. มุมกด 20 องศา เฟืองขับทำจากทองเหลืองมีฟัน 26 ซี่ เฟืองตามทำจากเหล็กกล้ามีฟัน 37 ซี่ ซึ่งมีตัวประกอบรวมเท่ากับ 1 เพื่อให้ฟันซี่ที่มีรอยแตกร้าวของเฟืองขับต้องขบกับฟันของเฟืองตามทุกซี่ก่อนที่จะกลับมาขบกับฟันซี่เดิมอีกครั้ง ฟันทุกๆ ซี่ของชุดเฟืองจะได้มีการสึกหรอเท่ากัน

เพื่อที่จะให้รอยแตกร้าวเกิดได้เร็วขึ้นและช่วยลดขนาดของแรงที่ใช้ในการสร้างรอยแตกร้าวเริ่มต้น (Pre-Crack) จึงสร้างรอยบากบริเวณฟิลเลตที่รัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางเฟืองประมาณ 47.56 มม. ซึ่งเป็นตำแหน่งที่คาดว่ามีความเค้นดึงมากที่สุด ตำแหน่งดังกล่าวสามารถหาได้จากจุดสัมผัสระหว่างฟิลเลตกับเส้นที่ลากทำมุม 30 องศากับแนวกึ่งกลางฟัน [5] ขนาดความลึกรอยบากโดยประมาณคือ 0.20 มม.

แรงที่กระทำต่อฟันเฟืองโดยเครื่องทดสอบความล้าเป็นแรงแบบแอมพลิจูดคงที่ (Constant Amplitude Loading) โดยที่ขนาดของแรงเปลี่ยนแปลงในลักษณะคลื่นไซน์ด้วยความถี่ 10 Hz ด้วยข้อจำกัดของเครื่องทดสอบความล้าที่ไม่สามารถตั้งให้ค่าความเค้นต่ำสุดเท่ากับศูนย์ จึงต้องตั้งค่าความเค้นให้เครื่องกดฟันเฟืองอยู่ตลอดเวลา การหาขนาดของแรงที่ใช้สร้างรอยแตกร้าวเริ่มต้นอาศัยเกณฑ์ของ Goodman และกราฟอายุความล้าคงที่ (Haigh's Diagram) ในกรณีของทองเหลืองซึ่งไม่มีขีดจำกัดความทนทาน (Endurance Limit, σ_e) จึงใช้การประมาณค่าขีดจำกัดความทนทาน (สำหรับการคงอยู่ 50 %) ในกรณีการติดตั้งนี้

$$\sigma_e = 0.45k_b k_c \sigma_u \quad (9)$$

โดยที่ k_b คือตัวประกอบของขนาด k_c คือตัวประกอบของแรง σ_u คือความต้านแรงดึงตรวจสอบ (Ultimate Strength)

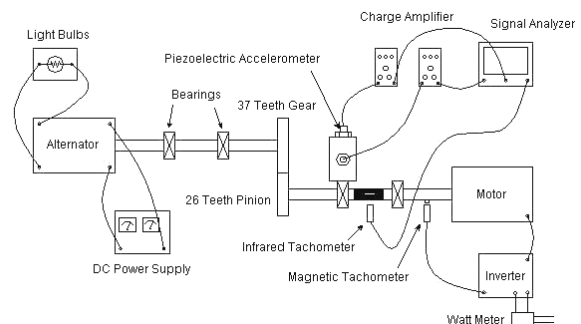
ขนาดของแรงส่วนเปลี่ยนและแรงเฉลี่ยสำหรับการสร้างรอยแตกร้าวเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1,668 และ 3,237 นิวตันตามลำดับ เมื่อได้รอยแตกร้าวเริ่มต้นแล้วจึงลดขนาดของแรงมากที่สุดลงประมาณ 10% โดยพยายามให้อัตราส่วนความเค้น (Stress Ratio) คงที่เพื่อชะลออัตราการขยายตัวของรอยแตกร้าวและป้องกันไม่ให้เกิดการเสียรูปแบบพลาสติกที่บริเวณปลายรอยแตกร้าว ทำการลดขนาดแรงลงทุกครั้งที่ย่อยรอยแตกร้าวยาวเพิ่มขึ้นประมาณ 0.2-0.3 มม. จนกระทั่งได้ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยแตกร้าวซึ่งวัดรวมความลึกของรอยบากทั้งสองด้านของเฟืองตามที่กำหนดไว้คือ 1.5 มม. 2.5 มม. 3.5 มม. และ 4.5 มม. ตัวอย่างรอยแตกร้าวบนซี่ฟันเฟืองแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งกำหนดให้สัญลักษณ์ R แทนด้านเดียวกับบ่าเฟืองในขณะที่ด้านตรงข้ามใช้สัญลักษณ์ F กำกับ



รูปที่ 2 รอยแตกร้าวบนซี่ฟันเฟืองซึ่งยาวประมาณ 3.5 มม.

4.2 การทดลอง

ชุดทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองดังแสดงในรูปที่ 3 ประกอบด้วยมอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 0.5 แรงม้า หมุนด้วยความเร็ว 500 และ 800 รอบต่อนาที เฟืองขับทองเหลืองซึ่งได้จำลองรอยแตกร้าวไว้ล่วงหน้า 4 ตัวและเฟืองที่ฟันมีโปรไฟล์สมบูรณ์ 2 ตัว เฟลาขับและเฟลาตามวางตัวขนานกันในแนวระดับ ใช้เครื่องปั่นไฟรถยนต์ (Alternator) เป็นตัวสร้างภาระให้กับชุดเฟือง 2 ระดับคือ 150 และ 300 วัตต์ ปรับระดับด้วยการเปลี่ยนความต่างศักย์ที่จ่ายให้ขดลวดสนาม ติดตั้งตัวตรวจรู้ชนิดวัดความเร่ง (Accelerometer) ที่ตำแหน่งแบร็งก์ใกล้เฟืองขับวัดสัญญาณในแนวระดับและแนวตั้งเพื่อส่งสัญญาณไปยังเครื่องขยายประจุ (Charge Amplifier) และเครื่องวิเคราะห์สัญญาณรุ่น 2035 โดยที่อุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณทั้งหมดเป็นของบริษัท Brüel & Kjær แทกโคมิเตอร์แบบอินฟราเรดเป็นชุดวงจรสำเร็จรูปที่ประยุกต์ติดตั้งเพิ่มเข้ามาเพื่อสร้างสัญญาณทริกเกอร์สำหรับการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเปลี่ยนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ



รูปที่ 3 ชุดอุปกรณ์ทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง

สำหรับเฟืองขับแต่ละตัวที่แต่ละสภาวะการทดลองทำการเก็บสัญญาณทั้ง 3 วิธีคือ การเปลี่ยนโดเมนความถี่ กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ และการเปลี่ยนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ แต่ละวิธีทำการเก็บสัญญาณ 5 ครั้ง

การเปลี่ยนโดเมนความถี่เก็บสัญญาณแต่ละครั้งใช้สัญญาณเฉลี่ย 20 ชุดสัญญาณ การเฉลี่ยเป็นแบบเหลื่อมกัน 75 % ใช้ฟังก์ชันแฮนนิ่ง (Hanning) เป็นฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก พิสัยของโดเมนความถี่ 800 Hz สำหรับสภาวะความเร็ว 500 รอบต่อนาที และ 1.6 kHz สำหรับสภาวะความเร็ว 800 รอบต่อนาที สัญญาณบนโดเมนเวลาแสดงผลเฉพาะชุดสัญญาณสุดท้ายเท่านั้น

กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่เก็บสัญญาณแต่ละครั้งใช้สัญญาณเฉลี่ย 10 ชุดสัญญาณ เหตุที่ใช้จำนวนชุดสัญญาณน้อยกว่าวิธีการเปลี่ยนโดเมนความถี่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบมีผลต่อคุณภาพสัญญาณและเวลาที่ใช้ในการเก็บสัญญาณแต่ละชุดนานขึ้น การเฉลี่ยเป็นแบบเหลื่อมกัน 75 % ใช้

ฟังก์ชันแฮนนิ่ง (Hanning) เป็นฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก สภาวะความเร็ว 500 รอบต่อนาที เลือกใช้ความถี่กึ่งกลางที่ 200 Hz ช่วงพิสัยของโดเมนความถี่ 200 Hz ส่วนกรณีความเร็ว 800 รอบต่อนาที เลือกใช้ความถี่กึ่งกลางที่ 320 Hz ช่วงพิสัยของโดเมนความถี่ 400 Hz

การเคลื่อนยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะเก็บสัญญาณแต่ละครั้งใช้สัญญาณเฉลี่ย 100 ชุดสัญญาณ โดยใช้สัญญาณทรiggerซึ่งรับมาจากแทกโคมิเตอร์แบบอินฟราเรดผ่านทางช่อง External Trigger Input ของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณสั่งให้เครื่องเริ่มเก็บสัญญาณแต่ละชุดสัญญาณ เลือกใช้ช่วงพิสัยของโดเมนความถี่เช่นเดียวกับการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเคลื่อนยบนโดเมนความถี่

4.3 การวิเคราะห์สัญญาณ

การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาทำได้โดยการสังเกตความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับรูปแบบการสั่นสะเทือนและพิจารณาแนวโน้มของพารามิเตอร์ต่อไปนี้

- **RMS** คือ แอมพลิจูดอาร์เอ็มเอส
- **Peak** คือ แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ
- **Crest Factor** คือ อัตราส่วนระหว่างค่า Peak ต่อค่า RMS
- **Kurtosis** คือ ค่าทางสถิติโมเมนต์อันดับที่ 4 สำหรับวัดขนาดการแผ่กว้างของการกระจายตัวของแอมพลิจูดการสั่นสะเทือน

การวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมทำได้โดยการพิจารณาแนวโน้มของค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- **1xGMF 2xGMF และ 3xGMF** คือ ความถี่การชนกันของคู่เฟืองและฮาร์โมนิกอันดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับ
- **1SBPL 2SBPL และ 3SBPL** คือ ชุดแถบความถี่ข้างด้านความถี่ต่ำกว่า 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF เท่ากับความถี่ของเฟืองขับฮาร์โมนิกที่ 2 และ 3 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังอาจปรากฏแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่ฮาร์โมนิกอื่น
- **1SBWL 2SBWL และ 3SBWL** คือ ชุดแถบความถี่ข้างด้านความถี่ต่ำกว่า 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF เท่ากับความถี่ของเฟืองตามฮาร์โมนิกที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

การวิเคราะห์สัญญาณแซปสตรัมทำได้โดยการพิจารณาแนวโน้มของค่าแอมพลิจูดที่คิวเฟรนซีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- **1/P 2/P และ 3/P** คือ คิวเฟรนซีเท่ากับ 1/(ความถี่เฟืองขับ) และฮาร์โมนิกที่ 2 และ 3 ตามลำดับ
- **1/W** คือ คิวเฟรนซีเท่ากับ 1/(ความถี่เฟืองตาม)

คิวเฟรนซีดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับความเป็นคาบของชุดแถบความถี่ข้างรอบความถี่ 1xGMF

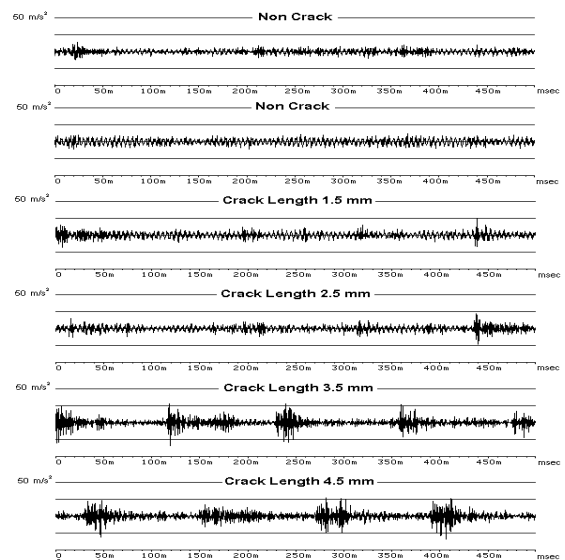
5. ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่สภาวะความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ พารามิเตอร์ต่างๆมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนที่สุดเนื่องจากว่าที่สภาวะนี้แรงที่ชุดเฟืองส่งผ่านมีขนาดมากที่สุด ส่วนที่สภาวะความเร็ว 800 รอบต่อนาที มีโมเมนต์ที่มากกว่าทำให้ชุดเฟืองกระแทกกันอย่างรุนแรงเนื่องจากไม่ใช้สารหล่อลื่นจึงปรากฏสัญญาณรบกวนช่วงความถี่กว้างจำนวนมาก จึงนำเสนอผลการทดลองเพียง

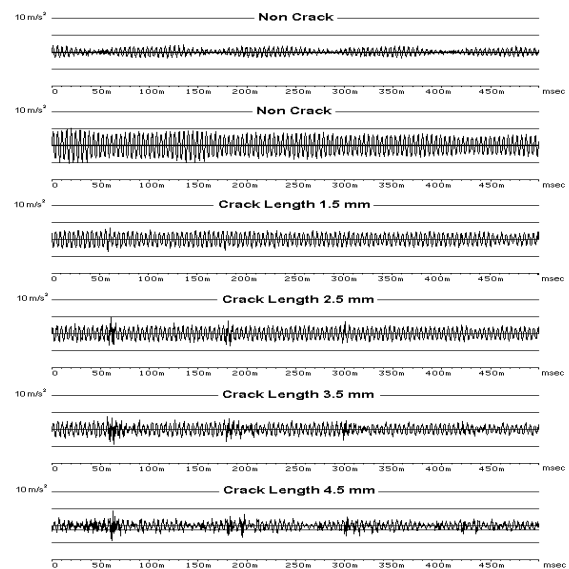
สภาวะการทดลองความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ เท่านั้น

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณบนโดเมนเวลาและความยาวรอยแตกร้าวบนซี่ฟันเฟือง

สัญญาณในแนวดิ่งที่เก็บด้วยวิธีการเคลื่อนยบนโดเมนความถี่สามารถสังเกตเห็นพัลส์ที่ห่างกันเท่ากับคาบการหมุนของเฟืองขับซึ่งน่าจะเกิดจากฟันซี่ที่แตกร้าวชนกันได้เมื่อขนาดรอยแตกร้าวยาว 3.5 มม. และ 4.5 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4



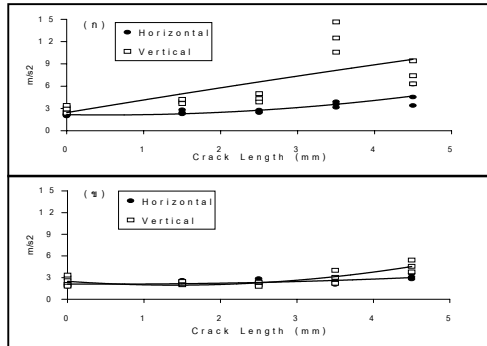
รูปที่ 4 สัญญาณบนโดเมนเวลาในแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วย Spectrum Averaging



รูปที่ 5 สัญญาณบนโดเมนเวลาในแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วย Synchronous Time Averaging

ในขณะที่สัญญาณในแนวดิ่งที่เก็บด้วยการเคลื่อนยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะสามารถสังเกตพบพัลส์ ชั่วขณะซึ่งเกิดจากการชนกันของฟันซี่ที่แตกร้าวได้อย่างชัดเจนตั้งแต่ความยาวรอยแตกร้าว 2.5 มม. โดย

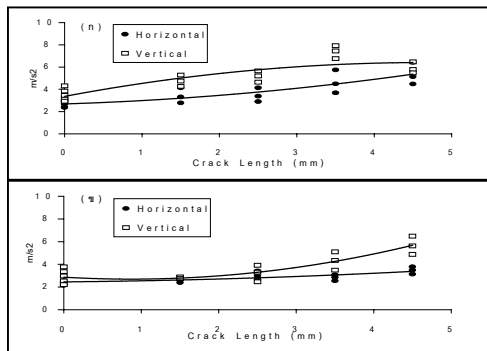
พื้นที่ที่แตกร้าวพบกันครั้งแรกที่เวลาประมาณ 60 มิลลิวินาที ดังแสดงในรูปที่ 5 ในขณะที่สัญญาณในแนวระดับพบว่าจังหวะที่พื้นที่ที่แตกร้าวพบกันมีแอมพลิจูดที่ต่ำกว่าและมีคาบการขบที่นานกว่าจังหวะการขบอื่นๆ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Kurtosis และความยาวรอยแตก

(ก) เก็บสัญญาณด้วย Spectrum Averaging

(ข) เก็บสัญญาณด้วย Synchronous Time Averaging



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Crest Factor และความยาวรอยแตก

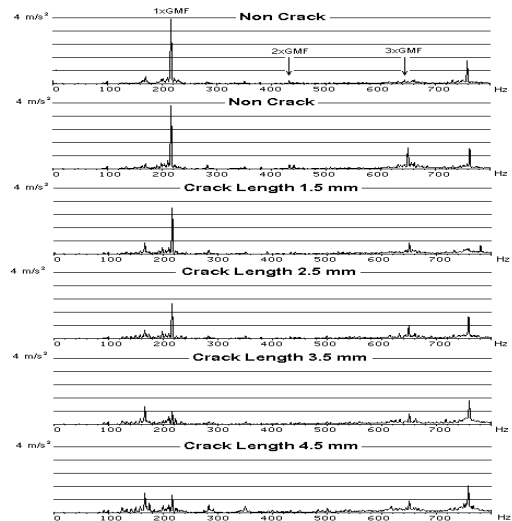
(ก) เก็บสัญญาณด้วย Spectrum Averaging

(ข) เก็บสัญญาณด้วย Synchronous Time Averaging

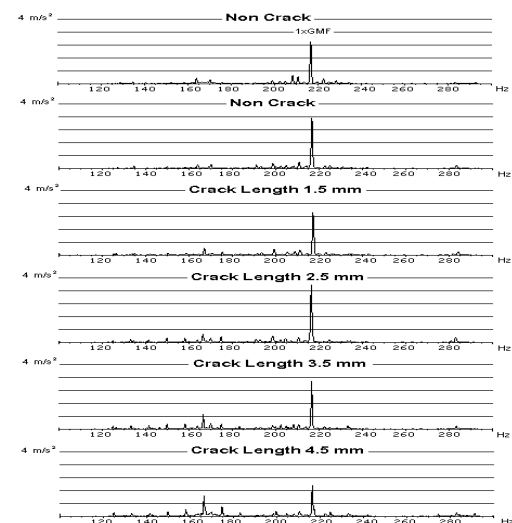
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆและความยาวรอยแตกซึ่งหาความสัมพันธ์ด้วยการถดถอยเชิงพหุนามกำลังสอง พบว่า RMS และ Peak มีค่าค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ Kurtosis มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากที่มีค่าต่ำกว่า 3 ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งค่า kurtosis ที่มากกว่า 3 บ่งชี้ว่าสัญญาณมีลักษณะสุ่มและมีพัลส์ชั่วขณะปะปนอยู่ค่าที่ได้จากสัญญาณในแนวตั้งมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่มากกว่าแนวระดับ Kurtosis ของสัญญาณในแนวตั้งที่ได้จากการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะมีค่ามากกว่า 3 เมื่อรอยแตกยาว 3.5 มม. แต่สำหรับสัญญาณที่ได้จากการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่มีสัญญาณรบกวนปะปนอยู่มากจึงทำให้ค่าของ kurtosis ไม่สัมพันธ์กับลักษณะการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองจึงไม่สามารถใช้ค่า kurtosis = 3 เป็นเกณฑ์บ่งชี้ถึงขีดจำกัดความยาวรอยแตกที่ที่ยอมรับได้ Crest Factor มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับ Kurtosis โดยสัญญาณในแนวตั้งมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าดังแสดงในรูปที่ 7 ค่า Crest Factor สูงขึ้นหมายถึงพัลส์ชั่วขณะมีแอมพลิจูดที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับแอมพลิจูดของสัญญาณโดยรวม

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสเปกตรัมและความยาวรอยแตก

รูปที่ 8,9 และ 10 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมของสัญญาณที่เก็บด้วยวิธีการต่างๆ ตลอดจนความสามารถในการแยกแยะชุดแถบความถี่

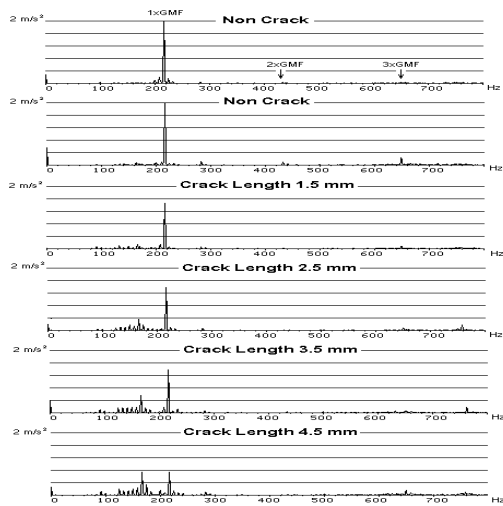


รูปที่ 8 สัญญาณสเปกตรัมในแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วย Spectrum Averaging

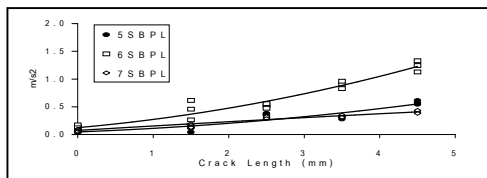


รูปที่ 9 สัญญาณสเปกตรัมในแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วย Zoom Processing

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆและความยาวรอยแตกซึ่งหาความสัมพันธ์ด้วยการถดถอยเชิงพหุนามกำลังสองพบว่าแอมพลิจูดของ 1xGMF มีแนวโน้มที่ลดลง ในขณะที่ผลการทดลองจากสภาวะความเร็ว 800 รอบต่อนาทีมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจึงคาดว่าไม่น่าเป็นผลมาจากความยาวรอยแตกแต่จะเป็นผลจากคุณภาพของเฟืองและปัญหาการติดตั้ง ในขณะที่แอมพลิจูดของ 2xGMF และ 3xGMF มีแนวโน้มที่คงที่



รูปที่ 10 สัญญาณสเปกตรัมในแวนระดับ เก็บสัญญาณด้วย Synchronous Time Averaging



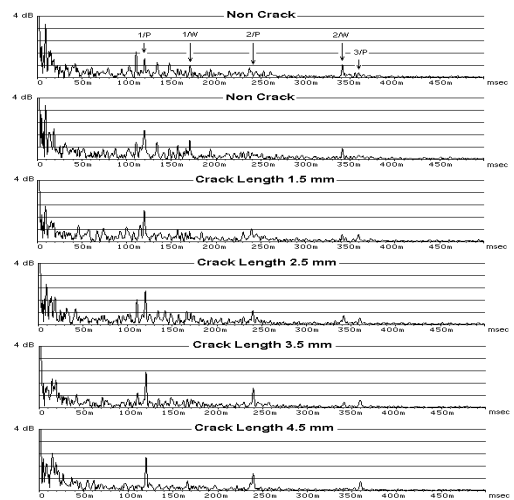
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของ SBPL และความยาวรอยแตก รวบรวมสัญญาณด้วย Zoom Processing

แอมพลิจูดของ 1SBPL, 2SBPL, 3SBPL, 1SBWL, 2SBWL และ 3SBWL มีแนวโน้มที่ค่อนข้างคงที่แม้ว่าพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญสำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นกับชุดเฟืองก็ตาม คาดว่าเป็นผลมาจากการออกแบบชุดเฟืองทดสอบใช้ความกว้างของฐานฟันและขนาดของชุดเฟืองที่สามารถติดตั้งบนแท่นทดสอบเป็นเกณฑ์ จึงทำให้ขนาดของฟันเฟืองสามารถส่งผ่านแรงได้มากกว่าขนาดภาระสูงสุดที่มอเตอร์สามารถทำงานได้ถึง 20 เท่า ส่งผลให้ความเบี่ยงเบนไปจากโค้งอินโวลูทของฟันซี่ที่แตก ร้าวมีขนาดเล็กใกล้เคียงกับฟันซี่อื่นๆ แต่จากการสังเกตภาพสัญญาณสเปกตรัมทั้ง 3 รูปพบว่าแถบความถี่ข้างอันเนื่องจากเฟืองขับทางด้านความถี่ต่ำกว่า 1xGMF ฮาร์โมนิกที่ 5, 6 และ 7 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน โดยเส้นแนวโน้มที่ได้จากการเก็บสัญญาณทั้ง 3 วิธีมีลักษณะที่คล้ายกันจึงแสดงกราฟความสัมพันธ์เฉพาะการเก็บสัญญาณด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งความถี่ของฮาร์โมนิกที่ 6 ของชุดแถบความถี่ข้างอันเนื่องจากเฟืองขับนี้คือ 166.67 Hz ตรงกับความถี่ธรรมชาติโหมดหนึ่งซึ่งมีแอมพลิจูดสูงเด่นในแวนระดับ เมื่อฟันแต่ละซี่เข้าขบกันการกระแทกกันของคู่ฟันเฟืองคล้ายกับการตีชุดทดลองด้วยค้อน ฟัลส์ที่เกิดขึ้นจึงไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติทุกโหมดเท่าที่พลังงานที่เกิดขึ้นจะทำให้ เมื่อฟันซี่ที่แตก ร้าวเข้าขบกันความถี่ธรรมชาติในการส่งผ่านแรงของฟันซี่นี้ลดลงจากฟันซี่อื่นๆ ในขณะที่ภาระที่ต้องส่งผ่านยังคงเดิมคล้ายกับการเอาค้อนตีบนฟันซี่ที่แตก ร้าวให้แรงขึ้น ดังนั้นเมื่อขนาดรอยแตก ร้าวยาวมากขึ้นความรุนแรงของการกระแทกกันจึงมากขึ้นทำให้แอมพลิจูดของความถี่ธรรมชาติที่ถูกกระตุ้น

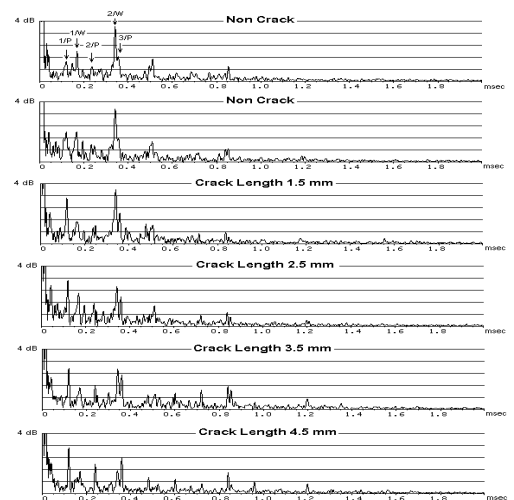
สูงขึ้น ประกอบกับจำนวนแถบความถี่ข้างจากเฟืองขับเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดรอยแตก ร้าวแถบความถี่ข้างบางฮาร์โมนิกจึงไปพ้องกับความถี่ธรรมชาตินี้ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ขึ้น

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเซปัสตรัมและความยาวรอยแตก รวบรวมสัญญาณด้วย

สัญญาณเซปัสตรัมที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณอยู่ในรูปของเฟาเวอร์เซปัสตรัมซึ่งคือการแปลงกลับแบบฟูริเยร์ของออสโคแกรมเชิงลอการิทึม ภาพสัญญาณเซปัสตรัมในแวนระดับที่เก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่แสดงในรูปที่ 12 การเก็บสัญญาณด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ในรูปที่ 13 มีช่วงเวลาในการเก็บสัญญาณที่นานขึ้นทำให้ความละเอียดของสัญญาณเซปัสตรัมลดลง แต่เนื่องจากสัญญาณสเปกตรัมปรากฏเฉพาะชุดแถบความถี่ข้างรอบ 1xGMF จึงมีลักษณะเป็นคาบตลอดช่วงความถี่ที่วิเคราะห์ ทำให้ปรากฏจำนวนฮาร์โมนิกของ 1/P และ 1/W มากขึ้น

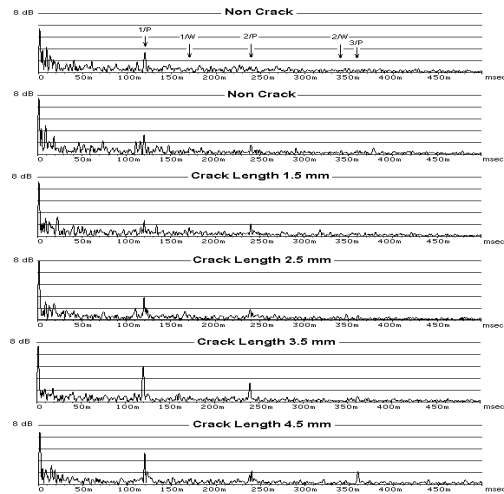


รูปที่ 12 สัญญาณเซปัสตรัมในแวนระดับ เก็บสัญญาณด้วย Spectrum Averaging

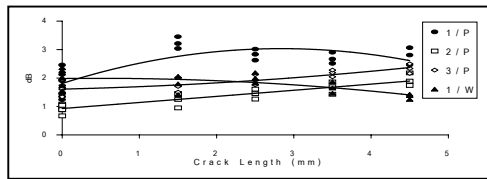


รูปที่ 13 สัญญาณเซปัสตรัมในแวนระดับ เก็บสัญญาณด้วย Zoom Processing

ในขณะที่สัญญาณเชปส์ตรัมที่เก็บด้วยการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะในรูปที่ 14 มีแอมплิจูดโดยรวมสูงกว่าสัญญาณที่เก็บด้วยการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ประมาณ 2 เท่า แต่ยอดเชปส์ตรัมที่คิวเฟรนซี 1/W มีแอมплิจูดต่ำลงจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้เนื่องมาจากการไม่ปรากฏชุดแถบความถี่ข้างอันเนื่องจากเฟืองตามในสัญญาณสเปกตรัม



รูปที่ 14 สัญญาณเชปส์ตรัมในแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วย Synchronous Time Averaging



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมплิจูดของเชปส์ตรัมและความยาวรอยแตก รวบรวมสัญญาณด้วย Zoom Processing

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆ และความยาวรอยแตก ซึ่งหาความสัมพันธ์ด้วยการถดถอยเชิงพหุนามกำลังสองพบว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวที่ได้จากการเก็บสัญญาณด้วยการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ และการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะมีลักษณะคล้ายกัน จึงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมплิจูดของเชปส์ตรัมและความยาวรอยแตกด้วยวิธีเก็บสัญญาณด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าแอมплิจูดที่ชัดเจนที่สุดดังแสดงในรูปที่ 15 แอมплิจูดของ 1/P มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งความยาวรอยแตก 2.5 มม. จากนั้นจึงมีค่าลดลง ส่วนแอมплิจูดของ 1/W มีแนวโน้มที่ลดลง การเพิ่มขึ้นของแอมплิจูดที่ 1/P ในช่วงแรกจะเป็นเพราะขนาดของการมอดูเลตทางแอมพลิจูดด้วยความถี่เฟืองเพิ่มขึ้นแต่เมื่อรอยแตกมีขนาดยาวมากขึ้นทำให้ขณะฟันที่แตกกระทบกันมีระยะพิชต์เปลี่ยนไปเนื่องจากการโก่งตัวที่มากกว่าฟันซี่อื่นๆ ประกอบกับฟันที่แตกยาว 3.5 มม. และ 4.5 มม. โก่งไปจากตำแหน่งปกติหลังจากสร้างรอยแตกแล้ว

ระยะพิชต์ที่เปลี่ยนไปนี้ส่งผลให้ขนาดการมอดูเลตทางความถี่ด้วยความถี่เฟืองมากขึ้นค่าแอมплิจูดของ 1/P จึงลดลง การที่แอมплิจูดที่ 1/W มีแนวโน้มลดลงมีสาเหตุจากทั้งการเพิ่มขึ้นของขนาดการมอดูเลตทางแอมพลิจูดและความถี่ด้วยความถี่เฟือง [6] ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้จุดที่แอมплิจูดของ 1/P มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วลดลงเป็นเกณฑ์บ่งชี้ถึงขีดจำกัดความยาวรอยแตกที่ที่ยอมรับได้

6. สรุป

ชุดเฟืองที่มีปัญหาการแตกร้าวของฟันที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน โดยที่การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาจำเป็นต้องอาศัยการเก็บสัญญาณด้วยการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะจึงจะสามารถระบุถึงตำแหน่งของฟันที่แตกร้าวจากการสังเกตลักษณะสัญญาณ และใช้ค่า Kurtosis และ Crest Factor ในการประเมินความรุนแรงของรอยแตกร้าว การวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมสามารถทำได้โดยการสังเกตการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดของชุดแถบความถี่ข้าง โดยแอมพลิจูดของฮาร์โมนิกที่พ้องกับความถี่ธรรมชาติมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก การวิเคราะห์เชปส์ตรัมทำได้ง่ายเนื่องจากจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องพิจารณามีน้อย สามารถใช้ค่าแอมплิจูดของ 1/P ที่เพิ่มขึ้นแล้วลดลงเป็นเกณฑ์บ่งชี้ถึงขีดจำกัดความยาวรอยแตกที่ที่ยอมรับได้ โดยสัญญาณที่เก็บด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนที่สุด

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนวิจัย และทุนสนับสนุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรศักดิ์ คคมิ, "การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและรอยแตกร้าวบนเฟือง", วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [2] Mark, W. D. "Analysis of the vibration excitation of gear systems: Basic theory", Journal of The Acoustical Society of America 63(5) (May 1978) : 1409-1430.
- [3] Wang, W. J., and McFadden, P. D. "Decomposition of gear motion signals and its application to gearbox diagnostics", Journal of Vibration and Acoustics 117 (July 1995) : 363-369.
- [4] McConnell, K. G. "Vibration testing : Theory and practice", New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [5] Dudley, D. W. "Handbook of practical gear design", New York: McGraw-Hill, 1984
- [6] สมชาย เดโชธรรมสถิต, "การศึกษากาการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองด้วยสเปกตรัมและเชปส์ตรัม", วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.