



ผลของตัวขับเคลื่อนต่อการสั่นที่บริเวณด้านจับขณะตีลูกเทนนิส

เมษันท์ ปรมาธิกุล, พ.บ. ว.ว.ศัลยศาสตร์ออร์โธปิดิกส์^{1,2*}

ฐิติ มีโอภาสมงคล, พ.บ. ว.ว.ศัลยศาสตร์ออร์โธปิดิกส์¹

บุญศักดิ์ หล่อพิพัฒน์ พธด.²

เฉลิม ชัยวัชรารณ²

ทศพร ยิ้มลัมย์²

¹ ภาควิชาศัลยศาสตร์ออร์โธปิดิกส์ คณะแพทยศาสตร์วชิรพยาบาล มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

² คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: mason@nmu.ac.th

Vajira Med J. 2020; 64(3) : 181-92

<http://dx.doi.org/10.14456/vmj.2020.xx>

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์: เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลของตัวขับเคลื่อนต่อแรงกระแทก (impact force) และการสั่นสะเทือน (vibration) ที่บริเวณด้านจับไม้เทนนิส เมื่อจุดกระทบของลูกเทนนิสมีความแตกต่างกัน

วิธีดำเนินการวิจัย: ใช้เครื่องเสิร์ฟลูกเทนนิสอัตโนมัติที่ความเร็วไม้เทนนิส 32 เมตรต่อวินาที จำลองการเสิร์ฟลูกเทนนิส โดยกำหนดจุดกระทบ 4 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งกึ่งกลางหน้าไม้ (center) ตำแหน่งเหนือกึ่งกลางหน้าไม้ (above center) ตำแหน่งใต้กึ่งกลางหน้าไม้ (below center) และตำแหน่งข้างกึ่งกลางหน้าไม้ (off-axis) โดยติดเซนเซอร์วัดแรงไว้ที่ด้ามไม้เทนนิส จากนั้นนำแรงกระทำที่ได้มาหาการสั่นสะเทือนโดยใช้ Fourier transform เปลี่ยนแรงกระทำเป็นความถี่ ทำการเปรียบเทียบแรงกระทำและความถี่ ระหว่างการตีโดยไม่ติดตัวขับเคลื่อน และติดตัวขับเคลื่อนทั้ง 3 รูปแบบ ที่ตำแหน่งที่ลูกเทนนิสกระทบหน้าไม้แตกต่างกัน

ผลการวิจัย: เมื่อตีลูกที่ตำแหน่งใต้กึ่งกลางหน้าไม้ พบว่าทั้งตัวขับเคลื่อนทั้ง 3 ชนิด สามารถลดการสั่นสะเทือนได้คลื่นความถี่ที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยตัวขับเคลื่อนแบบกระดุมสามารถลดช่วงคลื่นความถี่ที่ 3 จาก 191.7 ± 2.6 เฮิรตซ์ เป็น 172.9 ± 2.8 เฮิรตซ์ ($p = 0.001$) ตัวขับเคลื่อนแบบยางรัดสามารถลดช่วงคลื่นความถี่ที่ 3 เป็น 176.8 ± 4.4 เฮิรตซ์ ($p = 0.005$) และตัวขับเคลื่อนแบบตัวหนอนสามารถลดช่วงคลื่นความถี่ที่ 3 เป็น 178.8 ± 3.8 เฮิรตซ์ ($p = 0.011$) ในขณะที่การตีที่ตำแหน่งอื่นๆนั้น ได้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้พบว่าตัวขับเคลื่อนทั้งสามรูปแบบไม่สามารถลดแรงกระทำได้ไม่ว่าจะตีที่ตำแหน่งใดๆ

สรุป: ตัวขับเคลื่อนทั้งแบบกระดุม ยางรัด และตัวหนอน สามารถลดการสั่นสะเทือนในคลื่นความถี่ที่ 3 เมื่อตีลูกที่ตำแหน่งใต้กึ่งกลางหน้าไม้

คำสำคัญ: ตัวขับเคลื่อน, การสั่นสะเทือน, จุดกระทบลูก, ด้ามจับไม้เทนนิส



The Effect of Damper on Tennis Racket Handle Impact Force after Ball Impaction

Mason Porramatikul, MD.^{1, 2*}

Thiti Meeopartmongkon, MD.¹

Boonsakdi Lorpipatana Ph.D.B.S.²

Chalerm Chaiwatcharaporn Ed.D.²

Tossaporn Yimlamai Ph.D.²

¹ Department of orthopedics, Faculty of medicine, Vajira hospital, Navamindradhiraj University, Bangkok, Thailand

² Faculty of sport science, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

* Corresponding author, e-mail address: mason@nmu.ac.th

Vajira Med J. 2020; 64(3) : 181-92

<http://dx.doi.org/10.14456/vmj.2020.xx>

Abstract

Objective: To compare the peak force and vibration at tennis racket grip between different dampers and different tennis ball impact locations.

Methods: The peak force and vibration was measured at tennis rackets grips between 4 different damping conditions which were no damper, button damper, rubber band damper and worm damper. Tennis balls were served using a tennis strike-simulating machine with speed 32m/s. The peak force were recorded from a wireless force transducer attached to the grip during four locations on string bed: center, above center, below center, and off-axis. Vibration was calculated from time domain using Fourier transform.

Results: At a below center impact location, the button damper yielded a 10% reduction in some harmonic of the racket's vibration from 191.7 ± 2.6 Hz to 172.9 ± 2.8 Hz ($p=0.001$), the rubber band damper yielded a 8% reduction from 191.7 ± 2.6 Hz to 176.8 ± 4.4 Hz ($p = 0.005$), whereas the worm damper yielded a 7% reduction from 191.7 ± 2.6 Hz to 178.8 ± 3.8 Hz ($p = 0.011$). No significant effect of damper types on the vibration with the others impacts location. These dampers did not reduce the impact force at the grip regardless of the location.

Conclusion: Damper reduced the racket's vibration when the ball impacts a below center position.

Keywords: damper, vibration, peak force, ball impact location, tennis racket handle

บทนำ

ในการตีเทนนิสแต่ละครั้ง เมื่อลูกเทนนิสกระทบหน้าไม้ แรงจะถูกส่งมาสู่ข้อมือและข้อศอกของนักเทนนิสในลักษณะของแรงกระทำ (impact force) และการสั่นสะเทือน (post-impact vibration) เมื่อถูกแรงดังกล่าวกระทำซ้ำๆ ก็สามารถทำให้เกิดการบาดเจ็บได้ โดยมีรายงานวิจัยพบอุบัติการณ์การบาดเจ็บของรยางค์ส่วนบนประมาณร้อยละ 20-49¹⁻³ และกล้ามเนื้อที่พบการบาดเจ็บได้บ่อยคือ กล้ามเนื้อบริเวณข้อศอกและที่บริเวณข้อมือ⁴⁻⁷ ซึ่งแรงกระทำเหล่านี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัย เช่น ลักษณะโครงไม้ (racket structural property), ความเร็วหน้าไม้ (racket swing velocity), ความตึงเอ็นหน้าไม้ (string tension), แรงจับด้ามไม้ (grip force), ลักษณะการตี (stroke), ชนิดของลูกเทนนิส (tennis ball) และจุดกระทบลูก (ball impact location)⁸ ดังนั้นถ้าเราสามารถลดแรงกระทำดังกล่าวได้อาจส่งผลให้การบาดเจ็บลดลง การใช้ตัวซับแรง (damper) ซึ่งติดไว้ที่หน้าไม้ นั้น เชื่อว่าสามารถลดแรงกระทำและการสั่นสะเทือนของด้ามไม้ในขณะตีลูกได้ ส่งผลให้การบาดเจ็บของนักกีฬาลดลง อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยใดที่ยืนยันทฤษฎีนี้ได้อย่างแน่ชัด

ตัวซับแรงมีการผลิตรูปแบบต่างๆ กันมากมาย ซึ่งต้องมีลักษณะเป็นไปตามข้อกำหนดของสหพันธ์เทนนิสนานาชาติ (ITF) ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มลักษณะได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ ตัวซับแรงรูปกระดุม (button damper) มีลักษณะคล้ายกระดุมใช้ติดที่เอ็นแนวตั้งสองเส้น เอ็นแนวนอนหนึ่งเส้น ตัวซับแรงรูปยางรัด (rubber band) ใช้รัดเอ็นแนวตั้งสองเส้น และตัวซับแรงรูปตัวหนอน (worm damper) ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นยาวคล้ายตัวหนอน ใช้คล้องผ่านเส้นเอ็นแนวตั้งหลายเส้น

ที่ผ่านมาจึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับผลของตัวซับแรงไม่มากนัก มีการทดลองที่พบประโยชน์ของตัวซับแรงในบางสถานการณ์ เช่น Ameer และคณะ พบว่าในขณะที่ตี backhand stroke ตัวซับแรงช่วยลด myoelectric activity ของ wrist extensor muscle ในนักเทนนิสประสบการณ์น้อย (1-2 ปี) แต่ไม่ได้ลดในกลุ่มของนักเทนนิสประสบการณ์เยอะ (5-7 ปี)⁹ Timme และคณะ ได้สร้างแบบจำลองการสั่นของหน้าไม้ในแบบต่างๆ พบว่าตัวซับแรงสามารถลดการสั่นสะเทือน (vibration) ได้ ในไม้เทนนิสที่มีรูปแบบการสั่นของเอ็นหน้าไม้เทนนิส (Mode shape) บางรูปแบบที่มีความถี่สูง (>800 เฮิรตซ์)¹⁰

อย่างไรก็ตามมีการศึกษาที่เห็นแย้งเรื่องประโยชน์ของตัวซับแรง เช่น Stroede และคณะ พบว่าตัวซับแรงไม่ได้ช่วยลดการสั่นสะเทือนของโครงด้ามไม้ในขณะตีลูก โดยให้เหตุผลว่าเป็นเพราะตัวซับแรงมีมวลที่น้อยเกินไป (5-10 g) เมื่อเทียบกับมวลของไม้เทนนิส (>200 g) จึงส่งผลให้สัมผัสแรงสั่นสะเทือนของด้ามไม้ไม่ได้¹¹ Li และคณะได้ศึกษาผลของตัวซับแรงพบว่าตัวซับแรงไม่ได้ช่วยลดทั้งแรงกระทำและแรงสั่นสะเทือนในขณะตีลูก ไม่ว่าจะเป็นการตีที่ตำแหน่งใดๆ ไม่ว่าจะเป็นการตีลูกที่ dead spot (เกิดการสั่นสะเทือนที่มี amplitude สูง) หรือการตีลูกที่ node spot (เกิดการสั่นสะเทือนที่มี amplitude ต่ำ) ก็ตาม¹² Mohr และคณะพบว่าตัวซับแรงสามารถช่วยลดการสั่นสะเทือนเฉพาะที่บริเวณเอ็นหน้าไม้และช่วยลดเสียงรบกวน noise ในขณะตีลูกได้¹³ อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ไม่ได้ศึกษาผลของตัวซับแรงด้านการสั่นสะเทือนของโครงด้ามไม้

งานวิจัยหลายฉบับได้ยืนยันผลของจุดกระทบของลูกเทนนิสบนหน้าไม้ที่มีต่อแรงกระทำที่มือและแขน¹⁴⁻¹⁷ เช่น Henning พบว่า ในขณะที่ลูกเทนนิสกระทบหน้าไม้ที่เหนือจุดศูนย์กลาง 12 cm จะเกิดการสั่นที่บริเวณข้อมือมากกว่าลูกเทนนิสกระทบกลางหน้าไม้ถึง 3 เท่า¹⁸⁻¹⁹ เป็นต้น แต่ยังไม่มีการวิจัยใดทดสอบผลของการติดตัวซับแรงในกรณีที่จุดกระทบมีความแตกต่างกัน

ความเร็วหน้าไม้มีผลต่อแรงกระแทกและการสั่นของไม้เช่นกัน ยังไม่มีการวิจัยใดที่ศึกษาผลของการติดตัวซับแรงในกรณีที่ไม้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่า 20 เมตร/วินาทีมาก่อน ด้วยข้อจำกัดของการออกแบบการทดลอง^{12, 19-22} แต่ในการเสิร์ฟของนักเทนนิสอาชีพจะมีความเร็วของไม้ประมาณ 32 เมตร/วินาที งานวิจัยที่ผ่านมาของคณะผู้จัดทำเป็นการทดลองภายใต้ความเร็วหน้าไม้ที่สูงใกล้เคียงนักเทนนิสอาชีพ ผลการทดลองพบว่าตัวซับแรงรูปแบบกระดุม และรูปแบบตัวหนอนสามารถลดระยะเวลาการสั่นสะเทือน (damping time) ของด้ามไม้เมื่อตีลูกที่ตำแหน่งข้างจุดกึ่งกลางหน้าไม้ ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ²³

งานวิจัยชิ้นนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลของตัวซับแรงเพิ่มเติมในเรื่องผลด้านการสั่นสะเทือน (vibration) ของด้ามไม้ ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้แรงกระทำผ่านสมการ Fourier transform และได้เพิ่มตัวแปรต้นคือตัวซับแรงรูปแบบยางรัด เพื่อให้ครอบคลุมรูปแบบของตัวซับแรงที่มีใช้ในปัจจุบันมากยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์

เพื่อเปรียบเทียบแรงกระทำและการสั่นสะเทือนที่บริเวณด้ามจับ ระหว่างการไม่ใช้ตัวขับเคลื่อนกับการใช้ตัวขับเคลื่อนทั้ง 3 รูปแบบ ที่จุดกระทบแตกต่างกัน โดยการทดลองนี้เป็นการจำลองการเสิร์ฟจริงด้วยการเหวี่ยงไม้เข้าหาลูกเทนนิสด้วยความเร็วสูงด้วยเครื่องเสิร์ฟอัตโนมัติ และมีการควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่อาจส่งผลต่อแรงกระทำ เช่น ชนิดของไม้ ชนิดของเอ็น แรงตึงเอ็น ความเร็วหน้าไม้ จุดกระทบ เป็นต้น

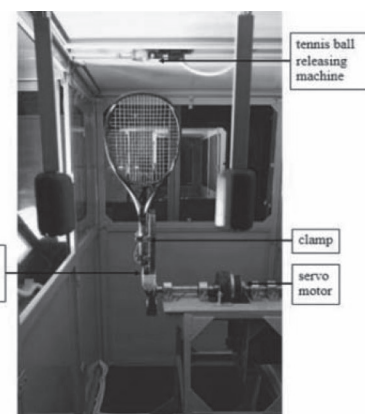
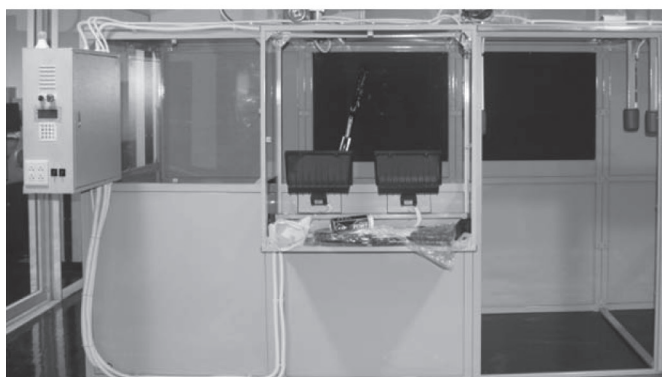
วิธีดำเนินการวิจัย

นำไม้เทนนิส YONEX (EZONE Xi 100, USA) ซึ่งมีน้ำหนัก 300 กรัม พื้นที่หน้าไม้ 100 ตารางนิ้ว ค่าความแข็ง 67 ความหนา 24 มม./ 26 มม./ 22 มม. ขึ้นเอ็นให้ได้ค่าความตึงเอ็นหน้าไม้ 60 ± 2 ปอนด์ ซึ่งเป็นความตึงเอ็นหน้าไม้ที่นักเทนนิสอาชีพทั่วไปนิยมใช้ (รูปที่ 1) มาติดตั้งเข้ากับเครื่องเสิร์ฟลูกเทนนิสอัตโนมัติ (รูปที่ 2) ทำการจำลองการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยนำไม้เทนนิสมาติดตั้งและยึดไว้กับแท่นหมุนเหวี่ยงที่สามารถปรับตั้งค่าความเร็วในการหมุนได้ โดยกำหนดความเร็วไว้ที่ 450 รอบ/นาที จะได้ความเร็วเชิงมุม (angular velocity) 47.12 rad/วินาที ซึ่งจะใกล้เคียงกับความเร็วของไม้ก่อนกระทบลูกในการแข่งขันเทนนิสจริง (ประมาณ 32 ม./วินาที)

และสามารถปรับเพื่อหาดำแหน่งจุดกระทบของลูกเทนนิสบนเอ็นหน้าไม้ได้จากชุดอุปกรณ์ความคุมการปล่อยลูก พร้อมทั้งติดตั้งตัววัดแรง (wireless force transducer) เข้ากับด้ามไม้ตัววัดแรง (wireless force transducer) Flexiforce WB201-H (Tekscan, USA) (รูปที่ 3) คืออุปกรณ์ที่ใช้ Piezoelectric sensor ซึ่งมีคุณสมบัติเปลี่ยนแรงกดให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ จึงสามารถนำมาใช้วัดแรงกระทำ แล้วแปลผลออกมาแสดงเป็นกราฟแรงกระทำ (นิวตัน) ที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ผ่านสัญญาณไร้สายได้



รูปที่ 1: การวัดความตึงเอ็นหน้าไม้เทนนิส



รูปที่ 2: เครื่องเสิร์ฟลูกเทนนิสอัตโนมัติ ณ ศูนย์ทดสอบวิจัยวัสดุและอุปกรณ์ทางการกีฬา (testing research center for sport material and equipment) คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3: ตัววัดแรง (WELF system transmitter และ flexiforce sensor (Tekscan, USA)

ขั้นตอนการทดลอง

ปล่อยลูกบอลลงมาตามแนวตั้ง เครื่องเสิร์ฟลูกเทนนิสอัตโนมัติจะจำลองการเสิร์ฟโดยสามารถควบคุมความเร็วหน้าไม้ให้คงที่และกำหนดจุดกระทบลูกได้อย่างแม่นยำ ใช้เครื่องบันทึกภาพความเร็วสูง DMAS 2,000 เฮิร์ตซ์ 2 ตัว (กล้องตัวที่ 1 จะถูกตั้งระนาบด้านข้างไม้เทนนิสเพื่อดูจังหวะที่บอลกระทบหน้าไม้ กล้องตัวที่ 2 จะถูกตั้งไว้ที่ระนาบด้านหลังไม้เทนนิสเพื่อยืนยันตำแหน่งที่บอลตกกระทบ) เริ่มทดสอบที่จุดกึ่งกลางหน้าไม้ (center) โดยจุดกึ่งกลางหน้าไม้ (geometric string center) กำหนดได้จากจุดตัดของเส้นกึ่งกลางหน้าไม้เทนนิสตามแนวตั้งและแนวนอน ตามรูปที่ 4A

ลูกเทนนิสที่ใช้คือ Dunlop FORT all court ซึ่งได้รับการทดสอบว่าได้มาตรฐานตามข้อกำหนดของสหพันธ์เทนนิสนานาชาติ (ITF) คือมีน้ำหนักอยู่ระหว่าง 1.975 ออนซ์ (56.0 กรัม) ถึง 2.095 ออนซ์ (59.4 กรัม)¹⁸ และมีการทดสอบก่อนทดลองต้องกระดอนสูงกว่า 53 นิ้ว (134.62 ซม.) แต่ไม่เกิน 58 นิ้ว (147.32 ซม.) เมื่อปล่อยให้ตกจากความสูง 100 นิ้ว (254.00 ซม.) บนพื้นที่มีผิวราบแข็ง ซึ่งลูกบอลแต่ละลูกจะใช้เสิร์ฟไม่เกิน 45 ครั้ง เมื่อความสูงของลูกเทนนิสไม่ได้ตามมาตรฐานจะเปลี่ยนลูกเทนนิสใหม่²⁴

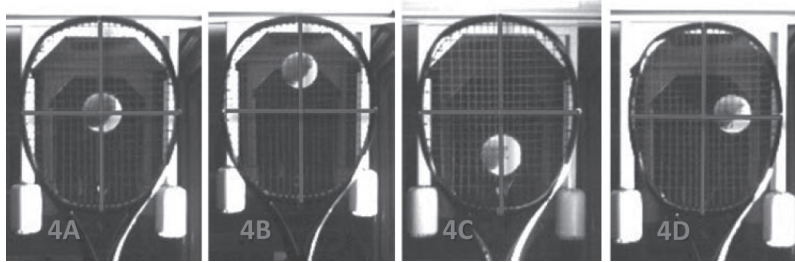
อ่านผลกราฟของแรงกระทำที่บริเวณด้ามจับมาแสดงที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ได้ (รูปภาพที่ 5) โดยจุด A คือจุดที่เริ่มมีแรงมากระทำ, จุด B คือจุดที่เกิดแรงกระทำสูงสุด (peak force), และจุด C คือจุดสิ้นสุดแรงกระทำบันทึกผล peak force ซึ่งสามารถหาช่วงเวลาที่เหมาะสมระดับ 1/6,000 วินาที ได้จาก

โปรแกรม flexiforce WELF system ทำการทดลองซ้ำจุดกระทบลูกละ 3 ครั้ง

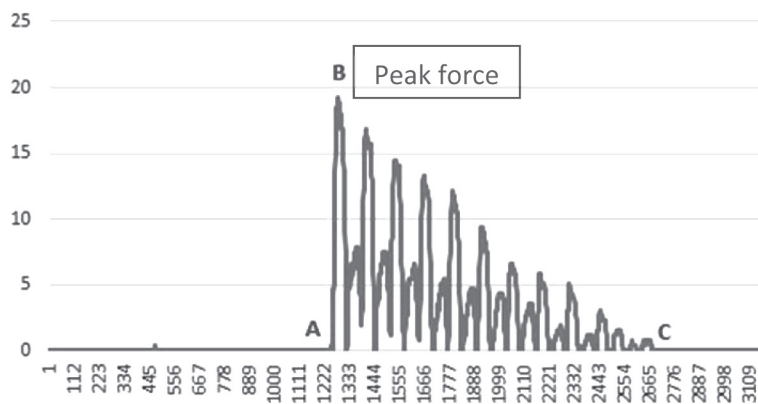
ติดตัวจับแรงรูปแบบกระดุมซึ่งมีร่องด้านข้างเอาไว้ให้สอดเอ็น เอ็นจะถูกหนีบอยู่กับผิวบนและผิวด้านข้างของตัวจับแรงโดยจัดขอบบนให้ชิดเอ็นแนวขวางเส้นแรก และอยู่ระหว่างเอ็นแนวตั้ง 2 เส้นกลาง (รูปภาพ 6B) ทำการทดลองเช่นเดิม จากนั้นสลับใช้ตัวจับแรงรูปแบบยางรัดซึ่งใช้รัดเอ็นแนวตั้งตรงกลางสองเส้น จัดขอบบนให้ชิดเอ็นแนวขวางเส้นแรก (รูปที่ 6C) สุดท้ายใช้ตัวจับแรงรูปแบบตัวหนอนซึ่งมีลักษณะยาวใช้สอดระหว่างเอ็นแนวตั้ง 8-10 ช่องตรงกลาง โดยจะสอดสลับกันระหว่างด้านบนและด้านล่างของเอ็นแนวตั้ง และติดใต้เอ็นแนวขวางเส้นล่างสุด 5 มม. (รูปที่ 6D) จากนั้นเปลี่ยนจุดกระทบลูกเป็น จุดที่ 2 เหนือกึ่งกลางหน้าไม้ 6 ซม. จุดที่ 3 ใต้กึ่งกลางหน้าไม้ 6 ซม. และจุดที่ 4 ข้างกึ่งกลางหน้าไม้ 6 ซม. ตามลำดับ (รูปที่ 4) ทดลองโดยไม่ติดตัวจับแรง, ติดตัวจับแรงรูปแบบกระดุม, ติดตัวจับแรงรูปแบบยางรัด, และติดตัวจับแรงรูปแบบตัวหนอนในทุกๆ จุดกระทบลูก

ส่วนความตึงของเอ็นที่ใช้จะทำการตรวจค่าความตึงใหม่ต่อการตีทุกๆ 10 ครั้ง เพื่อให้ค่าความตึงของเอ็นเป็นค่าคงที่มากที่สุด (ชัยสิทธิ์ ภาวิลาส 2014)²⁴ เพื่อควบคุมปัจจัยที่อาจมีผลต่อการทดลองให้ได้มากที่สุด

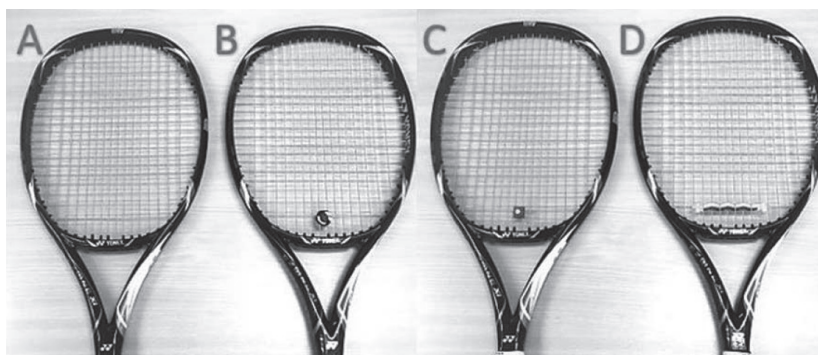
จากนั้นใช้ Fourier transform เปลี่ยนข้อมูลจาก time domain เป็น frequency domain เพื่อวิเคราะห์หาความถี่ของการสั่นของด้ามไม้เทนนิส



รูปที่ 4: แสดงตำแหน่งการใช้เครื่องจับภาพความเร็วสูง และตำแหน่งตกกระทบของบอลที่ต้องการจะศึกษา โดยที่ตำแหน่งที่ 1 (รูป 4A) คือ จุดกึ่งกลางหน้าไม้ (GSC), ตำแหน่งที่ 2 (รูป 4B) คือ จุดเหนือกึ่งกลางหน้าไม้ 6 ซม. (ประมาณ 1 ลูกเทนนิส), ตำแหน่งที่ 3 (รูป 4C) คือ จุดใต้กึ่งกลางหน้าไม้ 6 ซม. และตำแหน่งที่ 4 (รูป 4D) คือ จุด off-axis อยู่ข้างจุดกึ่งกลางหน้าไม้ 6 ซม.



รูปที่ 5: แสดงตัวอย่างผลการทดลองที่ได้จากตัว sensor โดยที่ แกน Y คือ แรงกระทำ (force) หน่วยเป็น ร้อยละ (%) ที่ sensor รับได้สูงสุด (667N) แกน X คือเวลา (10^{-4} second) โดยที่ จุด A คือ จุดที่มีแรงกระทำกระทำ, จุด B คือ จุดที่มีแรงกระทำสูงสุด (peak force) และจุด C คือ จุดสิ้นสุดแรงกระทำ



รูปที่ 6: ตัวช่วยแรงที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ไม้เทนนิสที่ไม่ติดการสั่น (A), ติดตัวช่วยแรงแบบกระดุม (button damper) (custom damp, Babolat, France) (B), ติดตัวช่วยแรงแบบยางรัด (rubber band damper) (Solaris shock off, unique sports, USA) และติดตัวช่วยแรงแบบตัวหนอน (worm damper) (Shockbuster II, Gamma, USA) (D)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ใช้โปรแกรม SPSS ver.22.0 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยสถิติ one-way ANOVA หาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปร (damped condition) ในแต่ละตำแหน่ง (location) ถ้าพบตำแหน่งใดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จะนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ด้วยวิธี Bonferroni โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

ผลการวิจัย

จากการทดลองตีลูกเทนนิสด้วยเครื่องเสิร์ฟอัตโนมัติ โดยใช้ไม้เทนนิส YONEX รุ่น EZONE Xi 100, ความตึงเอ็นหน้าไม้ 60 ปอนด์, ความเร็ว 32 ม./นาที่ ได้ผลการทดลอง ดังนี้

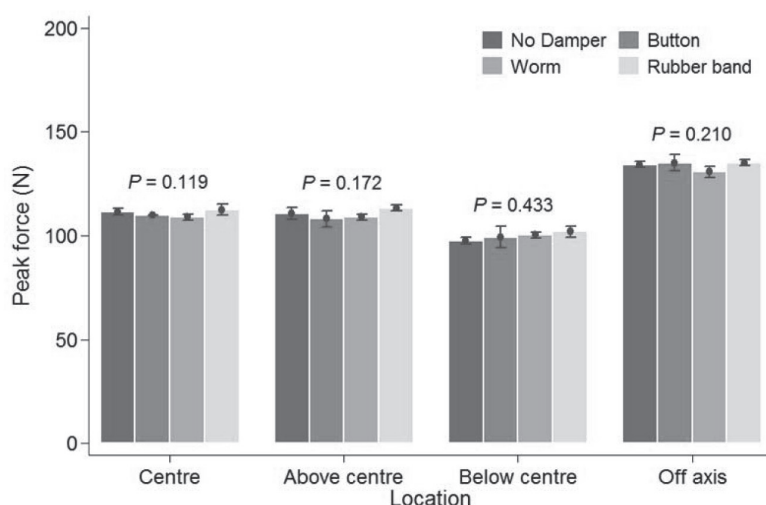
Peak force

ตำแหน่งจุดกึ่งกลางหน้าไม้ (center) เมื่อไม่ติดตัวจับแรงวัด peak force ได้ 111.6 ± 1.5 N เมื่อติดตัวจับแรงรูปแบบกระดุมวัดได้ 109.9 ± 0 N เมื่อติดตัวจับแรงแบบยางรัดวัดได้ 112.5 ± 2.6 N เมื่อติดตัวจับแรงแบบตัวหนอนวัดได้ 109.0 ± 1.5 N ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบด้วยวิธี one-way ANOVA พบว่าตัวจับแรงทั้ง 3 รูปแบบ ไม่ได้มีผลช่วยลด peak force ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p=0.119$) เมื่อตีลูกที่จุดกึ่งกลางหน้าไม้ ดังรูปที่ 7

ตำแหน่งเหนือจุดกึ่งกลางหน้าไม้ (above center) เมื่อไม่ติดตัวจับแรงวัด peak force ได้ 110.7 ± 3.0 N, เมื่อติดตัวจับแรงรูปแบบกระดุมวัดได้ 108.1 ± 4.0 N, เมื่อติดตัวจับแรงรูปแบบยางรัดวัดได้ 113.3 ± 1.5 N, เมื่อติดตัวจับแรงรูปแบบตัวหนอนวัดได้ 109.0 ± 1.5 N ซึ่งเปรียบเทียบแล้ว พบว่าตัวจับแรงทั้ง 3 รูปแบบ ไม่ได้มีผลช่วยลด peak force ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p=0.172$) เมื่อตีลูกที่ตำแหน่งเหนือจุดกึ่งกลางหน้าไม้

ตำแหน่งใต้จุดกึ่งกลางหน้าไม้ (below center) เมื่อไม่ติดตัวจับแรงวัด peak force ได้ 97.6 ± 1.5 N, เมื่อติดตัวจับแรงรูปแบบกระดุมวัดได้ 99.4 ± 5.2 N, เมื่อติดตัวจับแรงรูปแบบยางรัดวัดได้ 102.0 ± 2.6 N, เมื่อติดตัวจับแรงรูปแบบตัวหนอนวัดได้ 100.3 ± 1.5 N ซึ่งเปรียบเทียบแล้ว พบว่าตัวจับแรงทั้ง 3 รูปแบบ ไม่ได้มีผลช่วยลด peak force ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p=0.433$) เมื่อตีลูกที่ตำแหน่งใต้จุดกึ่งกลางหน้าไม้

ตำแหน่งข้างจุดกึ่งกลางหน้าไม้ (off-axis) เมื่อไม่ติดตัวจับแรงวัด peak force ได้ 134.3 ± 1.5 N, เมื่อติดตัวจับแรงรูปแบบกระดุมวัดได้ 135.1 ± 4.0 N, เมื่อติดตัวจับแรงรูปแบบยางรัดวัดได้ 135.1 ± 1.5 N, เมื่อติดตัวจับแรงรูปแบบตัวหนอนวัดได้ 130.8 ± 2.6 N ซึ่งเปรียบเทียบแล้ว พบว่าตัวจับแรงทั้ง 3 รูปแบบ ไม่ได้มีผลช่วยลด peak force ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p=0.210$) เมื่อตีลูกที่ตำแหน่งข้างจุดกึ่งกลางหน้าไม้



รูปที่ 7: แผนภูมิแท่งแสดงค่าแรงกระแทกสูงสุด (N) ของค่าเฉลี่ยการตีในแต่ละตำแหน่ง (*CN = Center, AC = Above center, BC = Below center, OA = Off-axis, N = No damper, D1 = Button damper, D2 = Worm damper)

สำหรับปัจจัยของตำแหน่งกระทบลูก (location) พบว่ามีผลต่อ peak force โดย peak force จะมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งข้างจุดกึ่งกลางหน้าไม้และน้อยที่สุดที่ตำแหน่งใต้จุดกึ่งกลางหน้าไม้ในทุกภาวะการติดหรือไม่ติดตัวข้อรับแรง ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$)

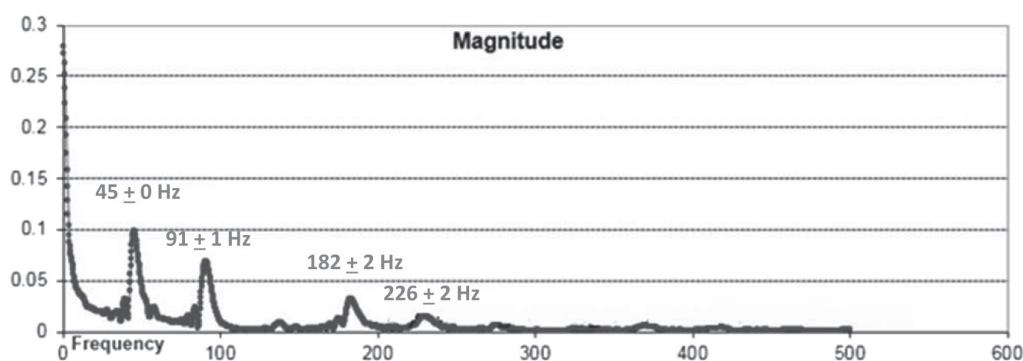
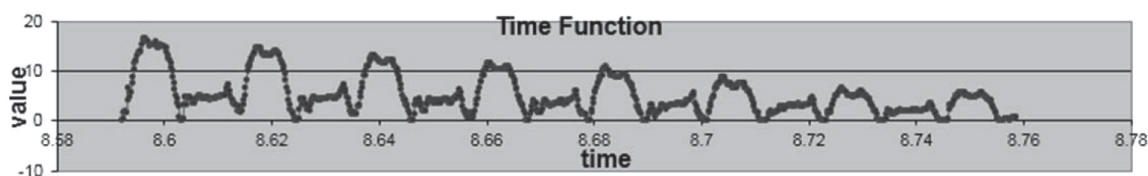
Vibration

การหาการสั่นสะเทือน สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าของแรงต่อเวลาใน time domain ซึ่งเป็นผลที่บันทึกได้จาก force sensor มาเป็น frequency domain โดยใช้สมการของ Fourier transform

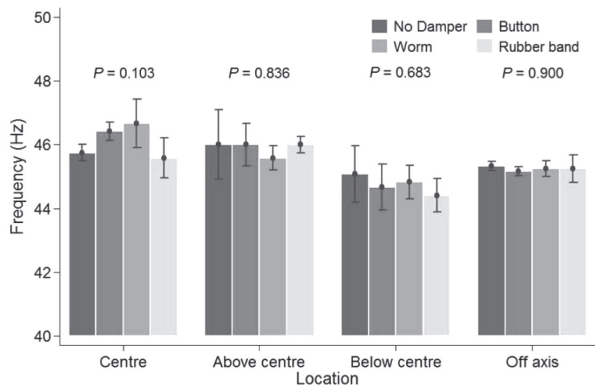
เมื่อใช้ Fourier transform แปลงความสัมพันธ์ของ amplitude ต่อเวลา เป็น amplitude ต่อ ความถี่ (frequency) ดังรูปที่ 8 เพื่อหาว่าแรงกระทำที่เกิดขึ้นนั้นทำให้เกิดความถี่เท่าไรบ้าง และปริมาณของคลื่นในแต่ละความถี่มากน้อยเพียงใด พบว่าในการตีแต่ละครั้งจะเกิดแรงสั่นสะเทือนหลักๆ 4 คลื่นความถี่ (harmonic vibration) ค่าเฉลี่ย 45 ± 0 เฮิรตซ์, 91 ± 1 เฮิรตซ์, 182 ± 2 เฮิรตซ์, และ 226 ± 2 เฮิรตซ์ ดังรูปที่ 8

ผลการทดลองพบว่า ในคลื่นความถี่ที่ 3 (182 ± 2 เฮิรตซ์) เมื่อตีลูกที่ตำแหน่งใต้จุดกึ่งกลางหน้าไม้ (below center)

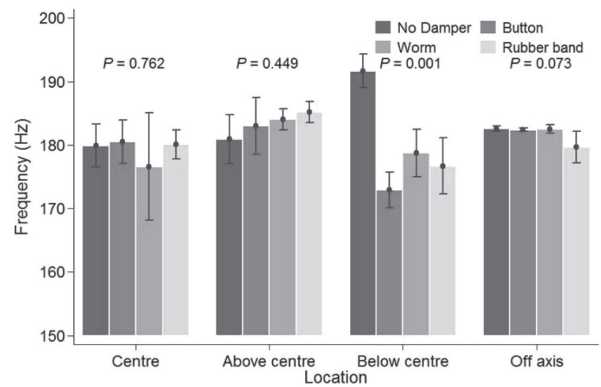
เมื่อไม่ติดตัวข้อรับแรงวัดความถี่ได้ 191.7 ± 2.6 เฮิรตซ์, เมื่อติดตัวข้อรับแรงรูปแบบกระดุมวัดได้ 172.9 ± 2.8 เฮิรตซ์, เมื่อติดตัวข้อรับแรงรูปแบบตัวหนอนวัดได้ 178.8 ± 3.8 เฮิรตซ์, ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธี one-way ANOVA พบว่าตัวข้อรับแรงรูปแบบกระดุมช่วยลด harmonic vibration ที่ 3 ลงได้ประมาณ 19 เฮิรตซ์ ตัวข้อรับแรงรูปแบบยางรัดช่วยลด harmonic vibration ที่ 3 ลงได้ประมาณ 15 เฮิรตซ์ และตัวข้อรับแรงรูปแบบตัวหนอนช่วยลด harmonic vibration ที่ 3 ลงได้ประมาณ 13 เฮิรตซ์ ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.001, 0.005$ และ 0.011 ตามลำดับ) และเมื่อใช้วิธี bonferroni เปรียบเทียบผลในการลด harmonic vibration ที่ 3 ซึ่งตัวข้อรับแรงรูปแบบกระดุมสามารถลดได้มากกว่าตัวข้อรับแรงรูปแบบยางรัดประมาณ 4 เฮิรตซ์ และมากกว่าตัวข้อรับแรงรูปแบบตัวหนอนประมาณ 6 เฮิรตซ์ นั้นพบว่าไม่ได้แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 1.0$ และ 0.25 ตามลำดับ) ในขณะที่การตีลูกที่ตำแหน่งกึ่งกลางหน้าไม้ (center), เหนือจุดกึ่งกลางหน้าไม้ (above center) และข้างจุดกึ่งกลางหน้าไม้ (off-axis) นั้น พบว่าตัวข้อรับแรงทั้ง 3 รูปแบบไม่ได้มีผลในการช่วยลดความถี่ที่ 3 ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.762, 0.449$ และ 0.073 ตามลำดับ)



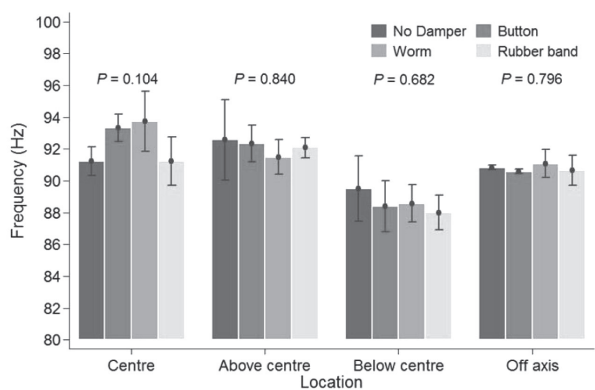
รูปที่ 8: การใช้ Fourier transform เปลี่ยนข้อมูลจาก time domain เป็น frequency domain



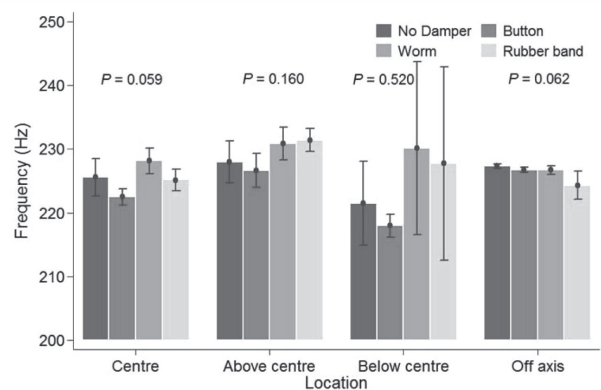
Harmonic Vibration 1



Harmonic Vibration 3



Harmonic Vibration 2



Harmonic Vibration 4

รูปที่ 9: แสดงผลด้านการสั่นสะเทือนทั้ง 4 คลื่นความถี่ โดย harmonic vibration 1 คือคลื่นความถี่ 45 ± 0 เฮิรตซ์, harmonic vibration 2 คือคลื่นความถี่ 91 ± 1 เฮิรตซ์, harmonic vibration 3 คือคลื่นความถี่ 182 ± 2 เฮิรตซ์, และ harmonic vibration 4 คือคลื่นความถี่ 226 ± 2 เฮิรตซ์ พบว่าตัวขับแรงทุกรูปแบบช่วยลด harmonic vibration ที่ 3 ลงได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเสิร์ฟลูทที่ตำแหน่งใต้จุดกึ่งกลางหน้าไม้ (below center) ($p = 0.001, 0.005$ และ 0.011 ตามลำดับ)

สำหรับคลื่นความถี่ที่ 1 (45 ± 0 เฮิร์ตซ์), คลื่นความถี่ที่ 2 (91 ± 1 เฮิร์ตซ์) และ คลื่นความถี่ที่ 4 (226 ± 2 เฮิร์ตซ์) พบว่าตัวขับแรงทั้ง 3 รูปแบบ ไม่ได้มีผลในการช่วยลดความถี่ดังกล่าวได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ไม่ว่าจะเป็นการตีที่ตำแหน่งกึ่งกลางหน้าไม้ ($p = 0.103, 0.104$ และ 0.059 ตามลำดับ), เหนือกึ่งกลางหน้าไม้ ($p = 0.836, 0.840$ และ 0.160 ตามลำดับ), ใต้กึ่งกลางหน้าไม้ ($p = 0.683, 0.682$ และ 0.520 ตามลำดับ) หรือข้างกึ่งกลางหน้าไม้ ($p = 0.900, 0.796$ และ 0.062 ตามลำดับ) ก็ตาม

วิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อดูผลของตัวช่วยแรงทั้ง 3 รูปแบบ (แบบกระดุม แบบยางรัด และแบบตัวหนอน) ในแง่ของการลดแรงกระแทกและการสั่นสะเทือนที่ด้ามจับ เวลาตีลูก โดยนับเป็นงานวิจัยชิ้นแรกที่ใช้การเหวี่ยงไม้เข้าตีลูก ด้วยความเร็วสูงคล้ายการเสิร์ฟเทนนิสในสถานการณ์จริง มีการควบคุมปัจจัยต่างๆที่อาจส่งผลต่อแรงกระทำที่บริเวณ ด้ามจับได้โดย ควบคุมชนิดของไม้ ชนิดของเอ็น แรงดึงของเอ็น ความเร็วหน้าไม้ ลักษณะการตี (stroke) จุดกระทบลูกบนหน้าไม้

ชนิดของลูกบอล การทดลองทำในห้องกระจกเพื่อไม่ให้มีแรงลมรบกวน นอกจากนั้นยังออกแบบการทดลองภายใต้สถานการณ์ที่มีแรงบิดหมุนเพิ่มเข้ามา คือการตีที่บริเวณข้างจุดกึ่งกลางหน้าไม้ ซึ่งที่ผ่านมาไม่เคยมีงานวิจัยที่ศึกษาผลของตัวขับเคลื่อนในการตีที่จุดข้างกึ่งกลางหน้าไม้มาก่อน

แรงกระแทกสูงสุด (Peak force)

การติดตัวขับเคลื่อนไม่ได้ส่งผลลดแรงกระแทกสูงสุด (peak force) ที่บริเวณด้ามจับได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเทียบกับภาวะที่ไม่ได้ติดตัวขับเคลื่อนว่าจะตีตำแหน่งใดก็ตาม โดย peak force สูงที่สุดที่ตำแหน่งข้างจุดกึ่งกลางหน้าไม้ (Off-axis) และต่ำที่สุดที่ตำแหน่งใต้จุดกึ่งกลางหน้าไม้ (below center) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Henning ในปี 1992 ที่พบว่า จุดกระทบลูกแบบไม่ตรงจุดศูนย์กลาง (off-axis) เกิดแรงกระทำที่บริเวณข้อมือมากกว่าจุดกระทบลูกกลางหน้าไม้¹⁹ ซึ่งการที่ตัวขับเคลื่อนไม่สามารถลดแรงกระแทกสูงสุดได้ ผู้วิจัยคิดว่าเป็นเพราะตัวขับเคลื่อนมีมวลที่น้อยมาก (5-20g) เมื่อเทียบกับไม้เทนนิส (300g) จึงทำให้ไม่สามารถดูดซับแรงกระแทกได้มากพอที่จะเห็นความแตกต่างอย่างมีนัยทางสถิติ

การสั่นสะเทือน (Vibration)

เมื่อใช้ Fourier transform หาค่าคลื่นความถี่ที่เกิดขึ้นที่ด้ามไม้ พบว่าในการตีลูกที่ตำแหน่งใต้จุดกึ่งกลางหน้าไม้นั้น ตัวขับเคลื่อนทั้ง 3 รูปแบบสามารถลดคลื่นความถี่ที่ 3 ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยตัวขับเคลื่อนรูปแบบกระดุมสามารถลดได้ 19 เฮิร์ตซ์ (จาก 191.7 ± 2.6 เฮิร์ตซ์ เป็น 172.9 ± 2.8 เฮิร์ตซ์) หรือลดไปได้ประมาณร้อยละ 10 ($p = 0.001$), ตัวขับเคลื่อนรูปแบบยางรัดสามารถลดได้ 15 เฮิร์ตซ์ (จาก 191.7 ± 2.6 เฮิร์ตซ์ เป็น 176.8 ± 4.4 เฮิร์ตซ์) หรือลดไปได้ประมาณร้อยละ 8 ($p = 0.005$) และตัวขับเคลื่อนรูปแบบตัวหนอนสามารถลดได้ 13 เฮิร์ตซ์ (จาก 191.7 ± 2.6 เฮิร์ตซ์ เป็น 178.8 ± 3.8 เฮิร์ตซ์) หรือลดไปได้ประมาณ ร้อยละ 7 ($p = 0.011$) ซึ่งยังไม่เคยมีงานวิจัยขึ้นใดพบความแตกต่างของตัวขับเคลื่อนหลายรูปแบบในการลดการสั่นสะเทือนมาก่อน และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการลดคลื่นความถี่รายคู่ระหว่างตัวขับเคลื่อนทั้ง 3 รูปแบบ ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ทั้งนี้ผลการทดลองสอดคล้องกับการศึกษาของ Nicholas Timme ในปี 2009 ที่พบว่าตัวขับเคลื่อนสามารถลดการสั่นสะเทือนได้ในไม้เทนนิสที่มีการสั่นสะเทือนของเอ็นหน้าไม้บางรูปแบบ (mode shape)¹⁰ และการศึกษาของ Mariam A. A. Ameer ในปี 2015 ที่พบว่าตัวขับเคลื่อนช่วยลด myoelectric activity ของ wrist extensor muscle เฉพาะในกลุ่มนักเทนนิสประสบการณ์น้อย (1-2 ปี) เท่านั้น⁹

สำหรับการตีลูกที่ตำแหน่งอื่น ไม่ว่าจะเป็นตำแหน่งข้างจุดกึ่งกลางหน้าไม้, เหนือจุดกึ่งกลางหน้าไม้ หรือข้างจุดกึ่งกลางหน้าไม้พบว่าตัวขับเคลื่อนทั้ง 3 รูปแบบ ไม่ได้ช่วยลดการสั่นสะเทือนได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของตัวยึดด้ามไม้ (clamp) ซึ่งการตีด้วยเครื่องเสริมฟลักเทนนิสอัตโนมัติที่หมุนด้วยความเร็ว 450 รอบ/นาที จำเป็นที่จะต้องยึดด้ามจับไว้ค่อนข้างแน่น (rigid) เพื่อไม่ให้ไม้หลุดขณะตีลูก ซึ่งในการตีเทนนิสของนักเทนนิส ที่ฝ่ามือจะมีความยืดหยุ่นประมาณหนึ่ง ส่งผลให้การใช้มือกำด้ามไม้เทนนิสนั้นจะอยู่ในภาวะ semi-rigid หรือ semi-clamp เท่านั้น ทำให้บริเวณด้ามยังมีการเคลื่อนไหวได้ระดับหนึ่ง มีผลให้เวลาตีลูก โครงไม้เทนนิสจะเกิดการตอบสนองเชิงกลคนละรูปแบบ (mode shape) กับในภาวะ rigid clamp ที่บริเวณด้ามจับไม่มีการเคลื่อนไหวเลย มีผลให้การสั่นสะเทือนแตกต่างกัน

สรุป

การทดลองนี้พบว่าทั้งตัวขับเคลื่อนรูปแบบกระดุม รูปแบบยางรัด และรูปแบบตัวหนอนสามารถช่วยลดการสั่นสะเทือนบางคลื่นความถี่ที่บริเวณด้ามจับได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อตีที่ตำแหน่งใต้จุดกึ่งกลางหน้าไม้ (below center) ส่วนการตีที่ตำแหน่งอื่นพบว่าตัวขับเคลื่อนทั้ง 3 รูปแบบไม่สามารถลดการสั่นสะเทือนได้

ตัวขับเคลื่อนทั้ง 3 รูปแบบไม่สามารถลดแรงกระทำสูงสุดได้ (peak force) ได้ไม่ว่าจะเป็นตำแหน่งใดก็ตาม ก็ตาม อย่างไรก็ตามตัวขับเคลื่อนก็ยังเป็นอุปกรณ์ที่นักเทนนิสนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นเพื่อประโยชน์ด้านการลดเสียงรบกวน การควบคุมทิศทางลูกบอล หรือความรู้สึกสบายขณะตีลูกก็ตาม ดังนั้นความรู้ในเรื่องผลของตัวขับเคลื่อนจึงยังคงเป็นปัจจัยที่ควรศึกษาเพิ่มเติม

ข้อเสนอแนะทางคลินิก

ผู้วิจัยเห็นว่าการติดตัวจับแรงนั้นสามารถลดการสั่นสะเทือนได้จริงในบางคลื่นความถี่ จึงแนะนำให้ผู้เล่นเทนนิสทั่วไปหรือผู้ที่มีปัญหาบาดเจ็บที่ข้อมือหรือข้อศอกพิจารณาใช้ตัวจับแรงเพื่อช่วยลดการสั่นสะเทือนของด้ามไม้ที่เกิดขึ้นหลังจากลูกเทนนิสกระทบหน้าไม้

ทั้งนี้การทดลองต่อไป ควรศึกษาผลของตัวจับแรงเพิ่มเติมในสถานการณ์ที่แตกต่างกันของตัวแปรต้นอื่นๆ ซึ่งส่งผลต่อแรงกระทำที่หน้าไม้ เช่น ความเร็วหน้าไม้ที่แตกต่างกัน หรือความตึงเอ็นที่แตกต่างกัน เป็นต้น

Conflict of interest

งานวิจัยนี้ไม่มี conflict of interest ไต และไม่รับผลประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ใด

กิตติกรรมประกาศ

ได้รับการสนับสนุนจาก “กองทุนวิจัยมหาวิทยาลัย นวมินทราชิราช (Navamindhradhiraj University Research Fund)” และ กองทุนจุฬา 90 ปีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนวิจัย และคณะวิทยาศาสตร์การกีฬาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์การทดลอง

เอกสารอ้างอิง

1. Abrams GD, Renstrom PA, Safran MR. Epidemiology of musculoskeletal injury in the tennis player. *Br J Sports Med* 2012;46: 492-8.
2. Sell K, Hainline B, Yorio M, Kovacs M. Injury trend analysis from the US Open Tennis Championships between 1994 and 2009. *Br J Sports Med* 2014; 48:546-51.
3. Dines JS, Bedi A, Williams PN, Dodson CC, Ellenbecker TS, Altchek DW, et al. Tennis injuries: epidemiology, pathophysiology, and treatment. *J Am Acad Orthop Surg* 2015;23:181-9.
4. De Smedt T, de Jong A, Van Leemput W, Lieven D, Van Glabbeek F. Lateral epicondylitis in tennis: update on aetiology, biomechanics and treatment. *Br J Sports Med* 2007;41:816-9.
5. Martin C, Bideau B, Ropars M, Delamarche P, Kulpa R. Upper limb joint kinetic analysis during tennis serve: Assessment of competitive level on efficiency and injury risks. *Scand J Med Sci Sports* 2014;24:700-7.
6. Groppe JL, Nirschl RP. A mechanical and electromyographical analysis of the effects of various joint counterforce braces on the tennis player. *Am J Sports Med* 1986;14:195-200.
7. Rompe JD, Decking J, Schoellner C, Theis C. Repetitive low-energy shock wave treatment for chronic lateral epicondylitis in tennis players. *Am J Sports Med* 2004;32:734-43.
8. Cross R. Factors affecting the vibration of tennis racquets. *Sports Engineering* 2015;18:135-47.
9. Ghada M. El-hafez and Amira A. A. Abdalla Mariam A. A. Ameer SME-h. Effect of String Vibration Damper of Tennis Racket on Myoelectric Activity of Wrist Extensors. *Int J Curr Res* 2015;7:14656-61.
10. Timme N, Morrison A. The mode shapes of a tennis racket and the effects of vibration dampers on those mode shapes. *J Acoust Soc Am* 2009;125:3650-6.
11. Stroede CL, Noble L, Walker HS. The effect of tennis racket string vibration dampers on racket handle vibrations and discomfort following impacts. *J Sports Sci* 1999;17:379-85.
12. Li F, Fewtrell D, Jenkins M. String vibration dampers do not reduce racket frame vibration transfer to the forearm. *J Sports Sci* 2004;22: 1041-52.
13. Mohr S, Cottey R, Lau D, Gillet C, Kotze J, Jolly M, et al. Dynamics of a String-Bed Damper on Tennis Rackets (P175). *The Engineering of Sport 7: Springer*; 2008. p. 179-89.

14. Duane V. Factors affecting force loading on the hand in the tennis forehand. *J Sports Med Phys Fitness* 1991;31:527-31.
15. Wei S-H, Chiang J-Y, Shiang T-Y, Chang H-Y. Comparison of shock transmission and forearm electromyography between experienced and recreational tennis players during backhand strokes. *Clin J Sport Med* 2006;16:129-35.
16. Naß D, Hennig EM, Schnabel G, editors. Ball impact location on a tennis racket head and its influence on ball speed, arm shock and vibration. *ISBS-Conference Proceedings Archive*; 1998.
17. Li L, Yang SH, Hwang C-S, Kim YS. Effects of string tension and impact location on tennis playing. *J Mech Sci Technol* 2009;23:2990-7.
18. Chow JW, Carlton LG, Lim YT, Chae WS, Shim JH, Kuenster AF, et al. Comparing the pre- and post-impact ball and racquet kinematics of elite tennis players' first and second serves: a preliminary study. *J Sports Sci* 2003;21:529-37.
19. Hennig EM, Rosenbaum D, Milani TL. Transfer of tennis racket vibrations onto the human forearm. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:1134-40.
20. Mohandhas BR, Makaram N, Drew TS, Wang W, Arnold GP, Abboud RJ. Racquet string tension directly affects force experienced at the elbow: implications for the development of lateral epicondylitis in tennis players. *Shoulder Elbow* 2016;8:184-91.
21. Hatze H. Forces and duration of impact, and grip tightness during the tennis stroke. *Med Sci Sports* 1976;8:88-95.
22. Englel J. Tennis: Dynamics of racket-grip interaction. *J Hand Surg* 1995;20:S77-S81.
23. Porramatikul M, Meeopartmongkon T. Effect of tennis racket damper on the peak force and damping time. *Journal of the Medical Association of Thailand*. 2018;101:S31-S6.
24. Pavilas C, Chaiwatcharaporn C. Comparison in maximum ball velocity of 3-structural characteristic rackets using simulated tennis flat serve. *J Sports Sci* 2014;14.