

บทวิทยากร

ความต้านทานการหักเนื่องจากการล้าจากการหมุนของไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมชนิดวันเคิร์ฟ ไฮเฟล็กซ์อีดีเอ็ม เวฟวันโกลด์ และเรซิพรอบลู ในคลองรากจำลองที่มีหนึ่งและสองความโค้ง Cyclic Fatigue Resistance of One Curve, Hyflex EDM, WaveOne Gold and Reciproc Blue Nickel-Titanium Rotary Files in Single and Double Curvature Simulated Canals

เถลิงศักดิ์ สมัครสมาน¹, ภิญญาดา สิ้นสมุท¹, รัชฎา ฉายจิต², อุทัยวรรณ อารยะตระกูลลิขิต¹

Thalerngsak Samaksamarn¹, Pinyada Sinsamutra¹, Rajda Chaichit², Uthaiwan Arayatrakoollikit¹

¹สาขาวิชาทันตกรรมบูรณะ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น ประเทศไทย

¹Department of Restorative Dentistry, Faculty of Dentistry, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

²สาขาวิชาทันตกรรมป้องกัน คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น ประเทศไทย

²Department of Preventive Dentistry, Faculty of Dentistry, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการต้านทานการหักเนื่องจากการล้าจากการหมุนของไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมที่ใช้เครื่องมือเพียงตัวเดียวในการขยายคลองราก 4 ชนิดในคลองรากฟันจำลองทั้งหนึ่งและสองความโค้ง ได้แก่ วันเคิร์ฟไฟล์ ไฮเฟล็กซ์อีดีเอ็มไฟล์ เวฟวันโกลด์ ไพรมารีไฟล์ และเรซิพรอบลู อาร์ 25 ไฟล์ กลุ่มละ 50 ไฟล์ ทดสอบโดยให้ไฟล์หมุนในคลองรากจำลองที่ทำจากแท่งสแตนเลสที่มีหนึ่งความโค้ง (มุมความโค้งคลองราก 60 องศา รัศมีความโค้ง 5 มิลลิเมตร) และคลองรากจำลองที่มีสองความโค้ง (มุมความโค้งส่วนต้น 60 องศา รัศมีความโค้ง 5 มิลลิเมตร และมุมความโค้งส่วนปลาย 70 องศา รัศมีความโค้ง 2 มิลลิเมตร) บันทึกเวลาตั้งแต่ไฟล์เริ่มหมุนจนกระทั่งหัก นำชิ้นส่วนไฟล์ที่หักทุกชิ้นไปศึกษาลักษณะการหักภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติทดสอบ Kruskal-Wallis Post hoc Dunn tests ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า ในคลองรากจำลองหนึ่งความโค้ง ไฮเฟล็กซ์อีดีเอ็มไฟล์มีความต้านทานการหักเนื่องจากการล้าจากการหมุนสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และในคลองรากจำลองสองความโค้ง พบว่า วันเคิร์ฟไฟล์มีความต้านทานการหักเนื่องจากการล้าจากการหมุนน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

คำสำคัญ: ความต้านทานการหักเนื่องจากการล้าจากการหมุน, คลองรากจำลอง, ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมแบบหมุนชนิดใช้เพียงตัวเดียว, คลองรากที่มีหนึ่งความโค้ง, คลองรากที่มีสองความโค้ง

Abstract

This study aimed to compare the cyclic fatigue resistance of four single-file Nickel-Titanium systems in both single curvature and double curvature canals. Fifty samples (N=50) of One Curve, Hyflex EDM, WaveOne Gold Primary, and Reciproc Blue R25 instruments were tested. Simulated canals made of stainless steel with a single (60° angle of curvature and 5 mm radius of curvature) or double curvature (coronal curve, 60° angle of curvature and 5 mm radius of curvature; and apical curve, 70° angle of curvature and 2 mm radius of curvature) were used for testing. Each file specimen was tested until fracture occurred and time of failure recorded. The fracture surface was examined using a scanning electron microscope to investigate types of fracture. The data were statistically analyzed using Kruskal-

Wallis Post hoc Dunn tests with 95 % confidence level. Results showed that Hyflex EDM had statistically highest fatigue resistance in single curvature canal. One Curve had statistically lowest fatigue resistance in double curvature canal.

Keywords: Cyclic fatigue resistance, Simulated canal, Single Nickel-Titanium rotary file, Single curvature, Double curvature

Received date:

Revised date:

Accepted date:

Doi:

ติดต่อเกี่ยวกับบทความ :

เถลิงศักดิ์ สมัครสมาน, สาขาวิชาทันตกรรมบูรณะ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 123 ถนนมิตรภาพ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002 ประเทศไทย โทรศัพท์: 043 348 310 อีเมล: thalerngsaks@yahoo.com

Correspondence to :

Thalerngsak Samaksamarn, Department of Restorative Dentistry, Faculty of Dentistry, Khon Kaen University, 123 Mittraphap Road, Nai-Muang, Muang District, Khon Kaen 40002, Thailand. Tel: 043 348 310 E-mail: thalerngsaks@yahoo.com

บทนำ

การทำความสะอาดและการตกแต่งคลองรากฟัน เป็น ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการรักษาคลองรากฟันให้ประสบผลสำเร็จ โดยมี วัตถุประสงค์เพื่อกำจัดเนื้อเยื่อที่ติดเชื่อในคลองรากฟัน และเตรียม คลองรากฟันให้เหมาะสมสำหรับการอุดคลองรากฟัน¹ ไฟล้นิกเกิล ไทเทเนียมชนิดหมุนด้วยเครื่องถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการ เตรียมคลองรากฟัน เนื่องจากคุณสมบัติของโลหะที่มีสภาพการยืดหยุ่นยิ่งยวด (Super Elasticity) และปรากฏการณ์จำรูป (Shape Memory Effect) ปัจจุบัน ไฟล้นิกเกิลไทเทเนียมได้รับการพัฒนา จนมาเป็นระบบที่ใช้ไฟล้นิกเกิลไทเทเนียมในการขยายคลองรากฟัน ทำให้ขยายคลองรากฟันได้ง่าย ลดจำนวนเครื่องมือในการทำงาน² แต่ปัญหาสำคัญจากการใช้ไฟล้นิกเกิลไทเทเนียมที่มีกบอบย คือ การหักของเครื่องมือ³ โดยการหักเกิดได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ การหัก จากการบิด (Torsional Failure) และการหักจากการหมุน (Cyclic Fatigue Failure)⁴ สาเหตุหนึ่งที่มีผลต่อการหักของไฟล้นิกเกิล คือ มุม ความโค้งและรัศมีมีความโค้งของคลองราก โดยคลองรากที่มีรัศมี ความโค้งลดลง ทำให้เพิ่มความเครียดของไฟล้นิกเกิลมากขึ้น และการต้านทานการหักของเครื่องมือลดลง⁵

ในปัจจุบันไฟล้นิกเกิลไทเทเนียมได้รับการพัฒนาโดยมี การปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หน้าตัดของเครื่องมือ การใช้กระบวนการทางความร้อนและกลการ (Thermomechanical Processing) กระบวนการกัดเซาะโลหะด้วย ตัวนำไฟฟ้า (Electro-Discharge Machining) เป็นต้น กระบวนการ เหล่านี้ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและต้านทานการหักของไฟล้นิกเกิลได้ดียิ่งขึ้น⁶⁻⁸ รวมทั้งระบบการหมุนของไฟล้นิกเกิลมีผลต่อการต้านทานการหักเนื่องจาก

การล้าจากการหมุน โดยระบบการหมุนของไฟล้นิกเกิลแบบไปกลับมีค่า ความต้านทานการหักสูงกว่าเมื่อเทียบกับระบบการหมุนของไฟล้นิกเกิล แบบทางเดียวไม่ย้อนกลับ^{9,10} แต่มีบางการศึกษา พบว่า ไฟล้นิกเกิลที่มีระบบ การหมุนของไฟล้นิกเกิลแบบทางเดียวไม่ย้อนกลับ มีความต้านทานการหัก ของไฟล้นิกเกิลสูงกว่าระบบการหมุนของไฟล้นิกเกิลแบบไปกลับ^{11,12}

วันเคิร์ฟ เป็นไฟล้นิกเกิลไทเทเนียมที่ใช้ไฟล้นิกเกิลเพียงตัวเดียวใน การขยายคลองรากฟันตัวใหม่ ถูกพัฒนามาจากไฟล้นิกเกิลระบบวันเซป (One Shape, Micro Mega, Besancon, France) โดยโลหะที่นำมาใช้ คือ ซีไวร์ (C.Wire) ซึ่งได้รับการปรับสภาพด้วยกระบวนการอุณหภูมิศาสตร์ หรือความร้อน (Heat Treatment) ทำให้เครื่องมือมีความสามารถในการ จำรูป โค้งงอได้ดี ทำให้ง่ายต่อการขยายคลองราก^{13,14} ทั้งนี้ การศึกษาเกี่ยวกับความต้านทานการหักเนื่องจากการล้าจากการหมุน ในไฟล้นิกเกิลระบบวันเคิร์ฟยังมีการศึกษาน้อยอยู่เมื่อเทียบกับระบบไฟล้นิกเกิล ชนิดอื่น วัตถุประสงค์ของการศึกษาคือเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ของการต้านทานการหักเนื่องจากการล้าจากการหมุนของไฟล้นิกเกิล ไทเทเนียมที่ใช้เครื่องมือเพียงตัวเดียวชนิดวันเคิร์ฟ ไฮเฟล็กซ์อีดีเอ็ม เวฟวันโกลด์ และเรซิพรอคบลู ในการขยายคลองรากฟันที่โค้งจากแบบ จำลองรากฟันที่มีหนึ่งและสองความโค้ง

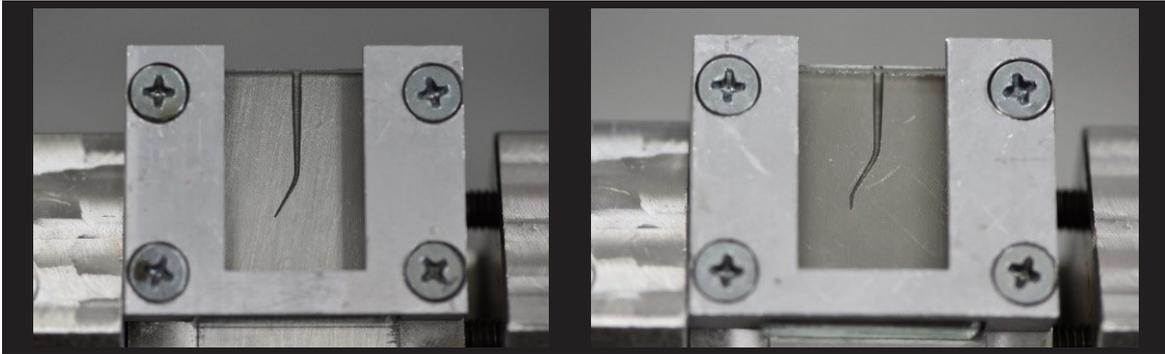
วัตถุประสงค์และวิธีการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดลองในห้องปฏิบัติการ คำนวณขนาดของ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา โดยอาศัยจากรายงานการศึกษาของ Gündogar & Özyürek¹¹ พบว่า จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่เหมาะสม คือ 25 ไฟล้นิกเกิล ต่อกลุ่มการทดลอง

การเตรียมคลองรากจำลอง

เจาะแท่นสแตนเลสเตรียมเป็นคลองรากจำลองที่มีหนึ่งความโค้งและสองความโค้ง โดยให้คลองรากมีขนาดใหญ่กว่าไฟล์จริงประมาณ 0.1 มิลลิเมตร เพื่อให้ไฟล์หมุนได้อย่างอิสระและมีความยาวของคลองรากอยู่ที่ 19 มิลลิเมตร แท่นสแตนเลสจะถูกคลุมด้วยกระดาษกันน้ำเพื่อให้เห็นการหมุนและการหักของไฟล์ได้ชัดเจน โดยไม่มีส่วนใดของไฟล์แตะกับกระจก¹⁵ คลองรากที่มีหนึ่งความโค้ง ออกแบบให้คลองรากมีมุมความโค้งของคลองราก 60 องศา และมี

รัศมีความโค้ง 5 มิลลิเมตร ร่วมกับจุดที่โค้งที่สุดอยู่ห่างจากปลายคลองราก 6 มิลลิเมตร ส่วนคลองรากที่มีสองความโค้ง ออกแบบโดยให้ความโค้งแรกในส่วนต้น (coronal) มีมุมความโค้งของคลองราก 60 องศา รัศมีความโค้ง 5 มิลลิเมตร จุดที่โค้งที่สุดห่างจากปลายคลองราก 8 มิลลิเมตร และความโค้งที่สองตำแหน่งส่วนปลาย (apical) มีมุมความโค้งของคลองราก 70 องศา รัศมีความโค้ง 2 มิลลิเมตร และจุดที่โค้งที่สุดห่างจากปลายคลองราก 2 มิลลิเมตร¹⁶



รูปที่ 1 คลองรากจำลองที่นำมาใช้ในการทดลอง
Figure 1 Artificial canals used for the experiment

ไฟล์ทุกตัวจะถูกตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอที่กำลังขยาย 30 เท่า เพื่อดูว่าเครื่องมือไม่มีความผิดปกติใด ๆ เช่น การเสียรูปร่าง รอยบิ่น เป็นต้น หากตรวจพบจะคัดไฟล์ตัวนั้นออกแล้วเปลี่ยนเป็นไฟล์ตัวใหม่

วัดความยาวของไฟล์ก่อนทดสอบทุกครั้งเพื่อเก็บเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบความยาวของไฟล์หลังจากการทดสอบเรียบร้อยแล้ว โดยใช้เครื่องวัดคาร์ลิปเปอร์ระบบตัวเลข วัดซ้ำเป็นจำนวนสามครั้งและนำมาหาค่าความยาวเฉลี่ยของเครื่องมือขณะทำการวัด ผู้ทดลองสวมแว่นขยายทางพันธุกรรมที่กำลังขยาย 3.5 เท่า แบ่งไฟล์ออกเป็น 4 กลุ่มย่อย ต่อกลุ่มรูปร่างคลองราก โดยไฟล์ทุกตัวมีความยาว 21 มิลลิเมตร หมุนด้วยเครื่องมือไฟฟ้ายี่ห้อวีดีดับเบิลยูซิลเวอร์ (Silver Reciproc, VDW, Munich, Germany) ดังนี้

กลุ่มที่ 1 วันเคิร์ฟไฟล์ (One Curve, Micro Mega, Besancon, France) (25/.06) ตั้งโปรแกรมเครื่องให้มีความเร็วรอบที่ 300 รอบต่อนาที และแรงบิดที่ 2.5 นิวตัน-เซนติเมตร

กลุ่มที่ 2 ไฮฟเล็กซ์อีดีเอ็มไฟล์ (Hyflex EDM, Coltene/Whaledent, Altstätten, Switzerland) (25/~) ตั้งโปรแกรมเครื่องให้มีความเร็วรอบที่ 400 รอบต่อนาที และแรงบิดที่ 2.5 นิวตัน-เซนติเมตร

กลุ่มที่ 3 เวฟวันโกลด์ ไพรมารีไฟล์ (WaveOne Gold Primary, Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) (25/.07)

ตั้งโปรแกรมเครื่องให้เป็น “WaveOne All” ซึ่งบริษัทผู้ผลิตแจ้งว่า WaveOne mode มีความเร็วรอบที่ 350 รอบต่อนาที¹⁷

กลุ่มที่ 4 เรซิพรอคบลู อาร์ 25 ไฟล์ เรซิพรอคบลู อาร์ 25 ไฟล์ (Reciproc Blue R25, VDW, Munich, Germany) (25/.08) ตั้งโปรแกรมเครื่องให้เป็น “Reciproc All” ซึ่งบริษัทผู้ผลิตแจ้งว่า Reciproc mode มีความเร็วรอบที่ 300 รอบต่อนาที¹⁷

ขณะทดสอบ แซ่แท่นคลองรากจำลองบนแท่นยึดในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) บรรจุในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 37±1 องศาเซลเซียส วัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ก่อนทดลองทุกครั้ง ขณะทดลอง ด้ามกรอกของมอเตอร์ไฟฟ้าจะถูกยึดด้วยที่ยึดพร้อมฐานเพื่อให้คงที่ ตั้งค่าเริ่มต้นของเครื่องตามชนิดของไฟล์ที่ใช้ และใช้สารกลีเซอรินเป็นสารหล่อลื่น บันทึกการทดลองด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล ตั้งค่าเป็นวิดีโอ 60 เฟรมต่อวินาที ไฟล์เริ่มหมุนจนกระทั่งหัก เพื่อนำเวลาที่ได้ออกมาคำนวณหาจำนวนรอบในการหมุนจนกระทั่งเครื่องมือหัก (NCF = Number of cycle to failure) โดยคำนวณตามสูตรดังนี้

$$\text{จำนวนรอบในการหมุน} = \frac{\text{ความเร็วรอบของเครื่องมือ} \times \text{เวลาที่หมุนจนกระทั่งเครื่องมือหัก}}{60}$$

ภายหลังจากการทดสอบ นำไฟล์มาทำความสะอาดด้วยเครื่องสั่นอัลตราโซนิคส์ ซับไฟล์ให้แห้ง นำชิ้นส่วนของไฟล์ที่หักมาวัดความยาวโดยใช้เครื่องวัดคาร์ลิปเปอร์ระบบตัวเลข วัดซ้ำเป็นจำนวน

สามครั้งและนำมาหาค่าความยาวเฉลี่ยของเครื่องมือ โดยสวมแว่นขยายทางทันตกรรมที่กำลังขยาย 3.5 เท่าขณะทำการวัด นำชิ้นส่วนไฟล์ที่หักทุกชิ้นเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุ จากนั้นนำไฟล์ไปศึกษาลักษณะการหักภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 150 และ 3500 เท่าบริเวณหน้าตัด และกำลังขยาย 50 เท่า บริเวณด้านข้าง เพื่อยืนยันว่าไฟล์หักเนื่องจากการล้าของโลหะจากการหมุน

การวิเคราะห์ข้อมูล

ในแต่ละความโค้งของคลองรากจำลอง เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแตกต่างของเวลาที่หมุนจนกระทั่งเครื่องมือหัก และจำนวนรอบในการหมุนจนกระทั่งเครื่องมือหัก โดยกำหนดให้ระดับนัยสำคัญที่

$\alpha = 0.05$ ทำการตรวจสอบลักษณะการแจกแจงข้อมูลโดยใช้การทดสอบ Shapiro-Wilk test พบว่า ข้อมูลมีการแจกแจงไม่ปกติ จึงใช้สถิติ Kruskal-Wallis post hoc Dunn tests

ผลการวิจัย

ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviations) ค่ามัธยฐาน (Median) และค่าพิสัยควอร์ไทล์ (Interquartile Range) ของเวลาที่หมุนจนกระทั่งเครื่องมือหัก และจำนวนรอบในการหมุนจนกระทั่งเครื่องมือหักในคลองรากฟันจำลองหนึ่งและสองความโค้ง แสดงในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่ามัธยฐาน และค่าพิสัยควอร์ไทล์ของเวลาที่หมุนจนกระทั่งเครื่องมือหัก และจำนวนรอบในการหมุนจนกระทั่งเครื่องมือหัก ในคลองรากฟันจำลองหนึ่งความโค้ง

Table 1 Mean, standard deviations, median, and interquartile range of time to failure (second) and number of cyclic to failure (NCF) in single curvature simulated canal

ชนิดของเครื่องมือที่หัก (จำนวน 25 ไฟล์/กลุ่ม)	เวลาที่หมุนจนกระทั่งเครื่องมือหัก (วินาที)		จำนวนรอบในการหมุนจนกระทั่งเครื่องมือหัก (NCF)	
	Mean±SD	Median±IR	Mean±SD	Median±IR
วันเคิร์ฟ (OC)	231.60 ± 23.44 ^c	239.00 ± 41.00	1158.00 ± 117.22 ^z	1195.00 ± 205.00
ไฮเพลคซ์อีดีเอ็ม (EDM)	178.60 ± 49.96 ^b	189.00 ± 82.50	1190.67 ± 333.07 ^z	1260.00 ± 550.00
เวฟวันโกลด์ (WOG)	91.40 ± 20.15 ^a	83.00 ± 40.00	533.17 ± 117.54 ^x	484.17 ± 233.33
เรซีพรอคบลู (RB)	168.64 ± 29.90 ^b	171.00 ± 55.00	843.20 ± 149.48 ^y	855.00 ± 275.00

* ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = .05$)

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่ามัธยฐาน และค่าพิสัยควอร์ไทล์ของเวลาที่หมุนจนกระทั่งเครื่องมือหัก และจำนวนรอบในการหมุนจนกระทั่งเครื่องมือหัก ในคลองรากฟันจำลองสองความโค้ง

Table 2 Mean, standard deviations, median, and interquartile range of time to failure (second) and number of cyclic to failure (NCF) in double curvature simulated canals

ชนิดของเครื่องมือที่หัก (จำนวน 25 ไฟล์/กลุ่ม)	เวลาที่หมุนจนกระทั่งเครื่องมือหัก (วินาที)		จำนวนรอบในการหมุนจนกระทั่งเครื่องมือหัก (NCF)	
	Mean±SD	Median±IR	Mean±SD	Median±IR
วันเคิร์ฟ (OC)	84.32 ± 28.91 ^b	78.00 ± 53.00	421.60 ± 144.53 ^x	390.00 ± 265.00
ไฮเพลคซ์อีดีเอ็ม (EDM)	110.64 ± 45.64 ^b	93.00 ± 71.00	737.60 ± 304.27 ^y	620.00 ± 473.33
เวฟวันโกลด์ (WOG)	105.00 ± 19.87 ^b	101.00 ± 27.00	612.50 ± 115.89 ^y	589.17 ± 157.50
เรซีพรอคบลู (RB)	156.28 ± 38.45 ^a	160.00 ± 57.50	781.40 ± 192.25 ^y	800.00 ± 287.50

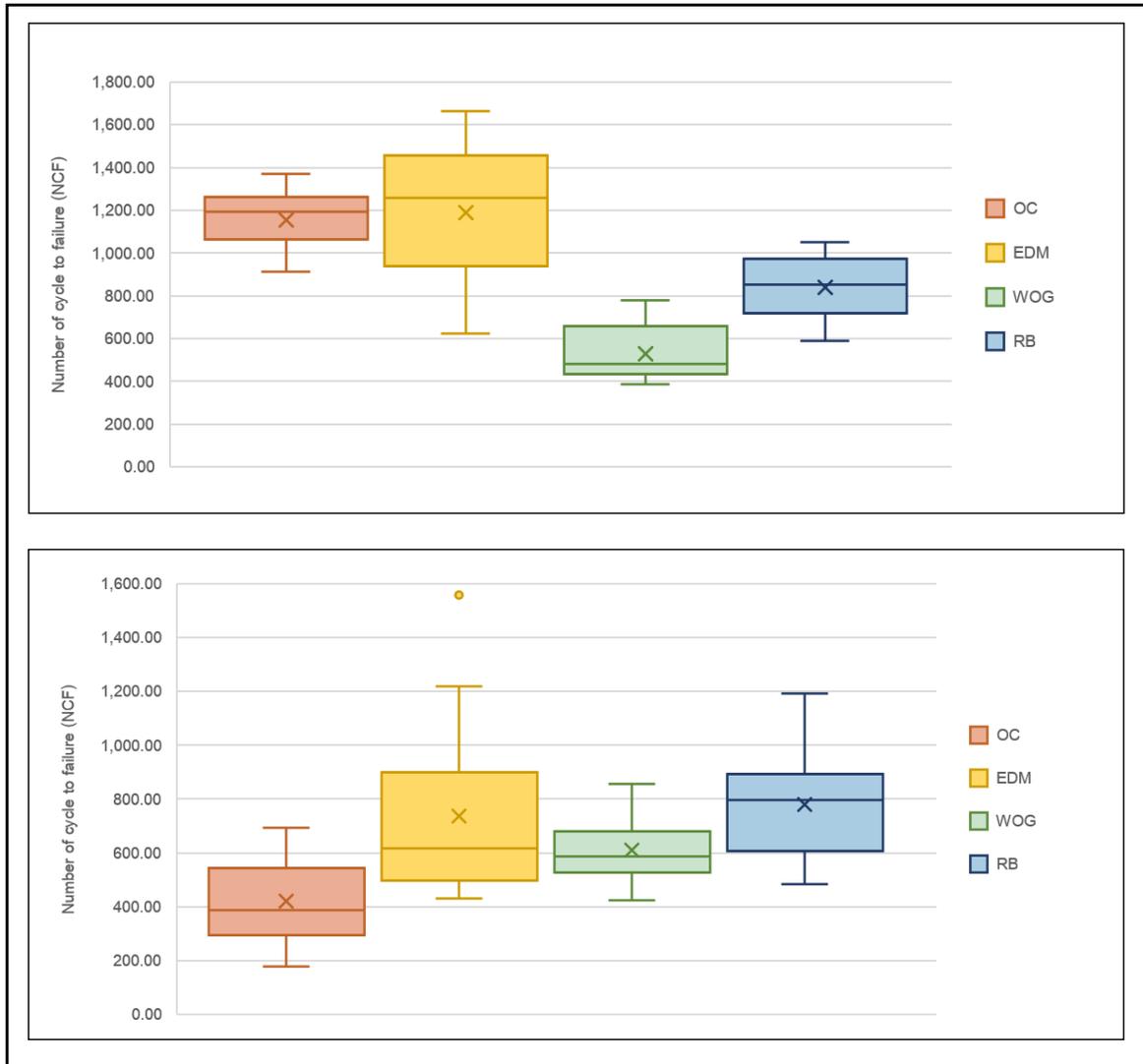
* ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = .05$)

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนรอบในการหมุนจนกระทั่งเครื่องมือหักในคลองรากฟันจำลองหนึ่งความโค้ง พบว่า ไฮเพลคซ์อีดีเอ็มไฟล์มีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (1190.67 ± 333.07) เมื่อเทียบ

กับเรซีพรอคบลูไฟล์ (843.20 ± 149.48) ($P = .003$) และเวฟวันโกลด์ไฟล์ (533.17 ± 117.54) ($P < .001$) แต่มีความแตกต่างกันอย่างไม่เป็นนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับวันเคิร์ฟไฟล์ (1158.00 ± 117.22) ($P = 1.000$)

(รูปที่ 2 บน) และเมื่อเปรียบเทียบจำนวนรอบในการหมุนจนกระทั่งเครื่องมือหักในคลองรากฟันจำลองสองความโค้ง พบว่า พบว่า วันเคิร์ฟไฟล์มีจำนวนรอบในการหมุนจนกระทั่งเครื่องมือหักน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (421.60 ± 144.53) เมื่อเทียบกับเวฟวันโกลด์ไฟล์

(612.50 ± 115.89) ($P = .004$) ไฮเฟล็กซ์อีดีเอ็มไฟล์ (737.60 ± 304.27) และเรซีพรอคบลูไฟล์ (781.40 ± 192.25) ($P < .001$) แต่เมื่อเทียบระหว่างเรซีพรอคบลูไฟล์ ไฮเฟล็กซ์อีดีเอ็มไฟล์ และเวฟวันโกลด์ไฟล์ พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (รูปที่ 2 ล่าง)

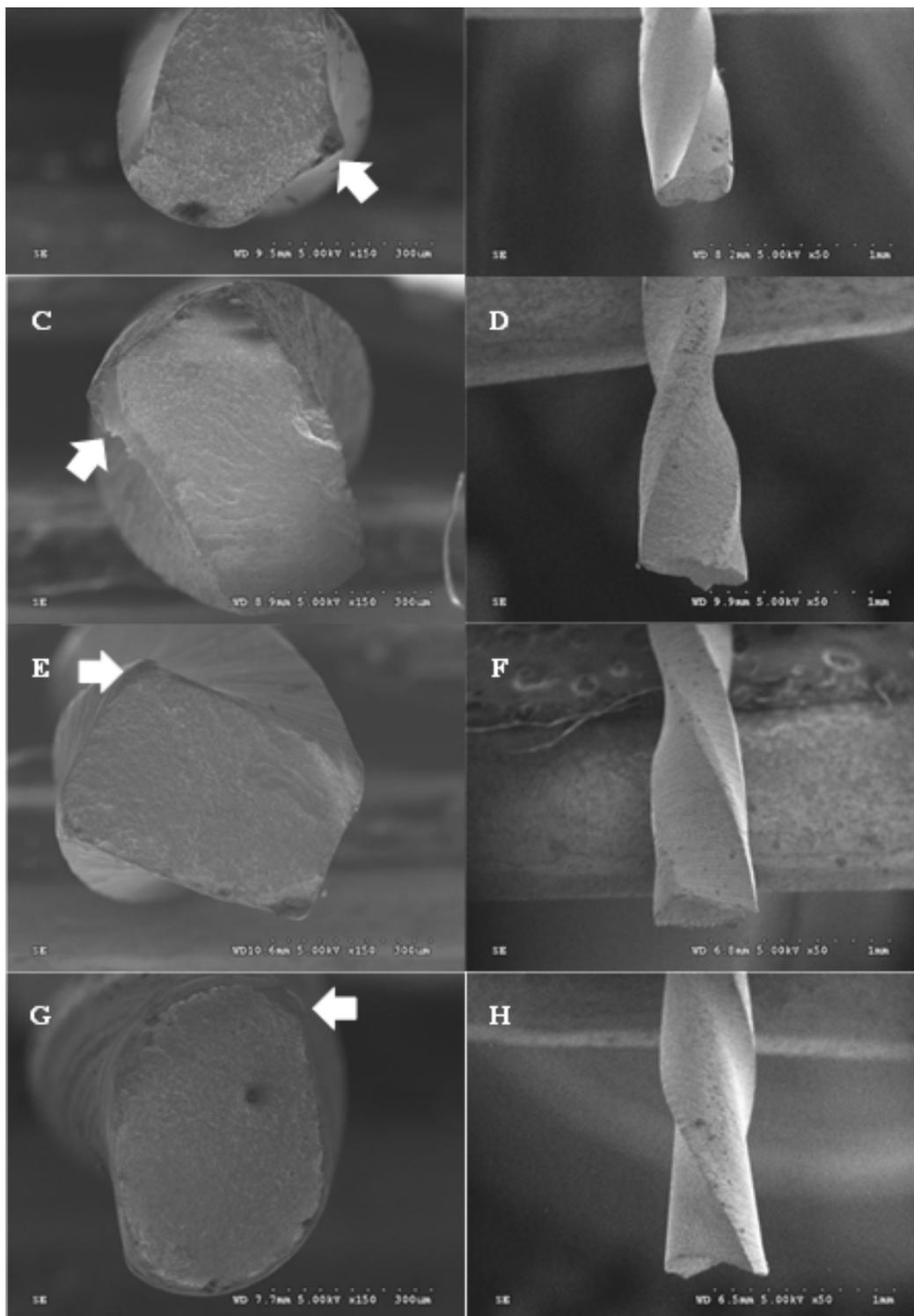


รูปที่ 2 แผนภาพกล่องแสดงจำนวนรอบในการหมุนจนกระทั่งเครื่องมือหักของไฟล์ทั้งหมด 4 ยี่ห้อ ในคลองรากฟันจำลองหนึ่งความโค้ง (บน) และคลองรากฟันจำลองสองความโค้ง (ล่าง)

Figure 2 Box plot showing the number of cyclic to failure (NCF) of 4-typed Nickel-Titanium rotary files in single curvature (upper) and double curvature simulated canals (lower)

เมื่อนำไฟล์ที่หักทุกชิ้นไปตรวจภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า หน้าตัดไฟล์มีบริเวณที่เป็นจุดเริ่มต้นของการหัก (Crack initiation area) โดยพบจุดเริ่มต้นตั้งแต่ 1 จุด

หรือมากกว่า และทุกกลุ่มไม่พบการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การบิดเกลียว บริเวณด้านข้างของไฟล์ ทั้งในคลองรากฟันจำลองที่มีหนึ่งและสองความโค้งของไฟล์ทุกตัว แสดงว่าไฟล์เกิดการหักจากการหมุน (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 จากการตรวจไฟล์ทุกกลุ่มภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หลังจากทดสอบการต้านทานการหักจากการหมุน โดยแสดงหน้าตัดและพื้นผิวด้านข้างของวันเคิร์ฟ (A-B), ไฮเฟล็กซ์อีดีเอ็ม (C-D), เวฟวันโกลด์ (E-F) และเรซิพรอคบลู (G-H) โดยตำแหน่งของลูกศรสีขาวชี้ตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการหัก

Figure 3 Scanning electron micrographs of fracture surface and longitudinal surface of One Curve (A-B), Hyflex EDM (C-D), WaveOne Gold (E-F) and Reciproc Blue (G-H) in cyclic fatigue resistance test. The white arrows show crack initiation areas

บทวิจารณ์

ประโยชน์จากการใช้ไฟล้นิกเกิลไทเทเนียมเพียงตัวเดียวในการเตรียมคลองราก คือ ช่วยลดเวลาในการทำงาน ลดจำนวนไฟล์ในการขยายคลองราก¹⁸ แต่กลับทำให้ไฟล์มีความเครียดสูง ซึ่งเสี่ยงต่อการเกิดการหักจากการล้าและการงอ² ดังนั้น ไฟล้นิกเกิลไทเทเนียมเพียงตัวเดียวในการขยายคลองราก ควรมีความต้านทานในการหักสูง¹⁹ ซึ่งอุบัติการณ์ (incidence) ในการเกิดการหักของไฟล้นิกเกิลไทเทเนียมอยู่ในช่วงร้อยละ 0.09 – 5^{20,21} โดยเมื่อเกิดการหักของไฟล์ ทำให้แนวทางในการพยากรณ์โรค (prognosis) หลังจากการรักษารากเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากชิ้นส่วนของไฟล์ไปกีดขวางบริเวณปลายราก ทำให้ไม่สามารถฆ่าเชื้อ (disinfection) ในคลองรากฟันได้²²

ในการศึกษานี้ได้กำหนดให้อุณหภูมิแวดล้อมขณะทดลองอยู่ที่ 37 องศาเซลเซียส เพื่อจำลองอุณหภูมิที่กำหนดในคลองรากฟันจากหลาย ๆ การศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิโดยรอบสูงขึ้น ความสามารถในการต้านทานการแตกหักของไฟล์จะลดลง²³⁻²⁵ ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมอยู่ระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นออสเทนไนต์ (Austenite start temperature (A_s)) และอุณหภูมิสิ้นสุดออสเทนไนต์ (Austenite finish temperature (A_f)) โลหะจะประกอบไปด้วยวัฏภาคมาร์เทนไซต์และวัฏภาคออสเทนไนต์ ทำให้มีความต้านทานการหักสูงขึ้น²⁶ ยิ่งโลหะอยู่ในวัฏภาคมาร์เทนไซต์มากเท่าไร ยิ่งส่งผลให้จำนวนรอบในการหมุนเพิ่มสูงขึ้น²⁷ การศึกษานี้เลือกทดสอบในคลองรากจำลองที่ทำจากโลหะสแตนเลสที่มีการกำหนดมาตรฐานความผาย มุมความโค้งและรัศมีความโค้งของคลองราก และความยาวของคลองราก เพื่อให้ได้ลักษณะคลองรากจำลองที่มีความแม่นยำ และควบคุมให้ผลลัพธ์จากการทดสอบมีค่าความคลาดเคลื่อนให้น้อยที่สุด การใช้แบบจำลองคลองรากจะมีมาตรฐานกว่าพื้นฐานชาติหากต้องนำผลการทดสอบของไฟล์แต่ละชนิดมาเปรียบเทียบ²⁸ ในการทดสอบนี้ได้เลือกใช้สารกลีเซอริน (glycerin) มาเป็นสารหล่อลื่น (lubricants) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการเสียดสีระหว่างไฟล้นิกเกิลไทเทเนียมต่อผนังคลองรากจำลอง และลดการเกิดความร้อนในคลองรากจำลอง²⁹⁻³¹

ไฟล้นิกเกิลไทเทเนียมแต่ละชนิดที่เลือกนำมาทดสอบทั้ง 4 ยี่ห้อ เป็นไฟล์ที่ใช้เครื่องมือเพียงตัวเดียวในการขยายคลองรากที่มีความต่างกันทั้งระบบการหมุน ขนาด และหน้าตัดของไฟล์ รวมทั้งผ่านการปรับสภาพของโลหะด้วยกระบวนการทางความร้อนและกลการที่ต่างกัน โดยไฮเฟลกซ์อีเอ็มไฟล์เป็นไฟล์ที่มีลักษณะทางกลศาสตร์เป็นรุ่นที่ห้า ผลิตจากโลหะชนิดซีเอ็มวีที่ผ่านกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า เวฟวันโกลด์ไฟล์พัฒนาต่อมาจากเวฟวันไฟล์ โดยเวฟวันโกลด์ไฟล์ยังคงระบบการหมุนแบบไปกลับ แต่มีการปรับเปลี่ยนโลหะด้วยเทคโนโลยีโกลด์เทอร์มอลทรีทเมนต์

(Gold thermal treatment) เรซิพรอคบลูไฟล์ผลิตด้วยวิธีบลูฮีททรีทเมนต์ (Blue heat-treatment) ที่มีระบบการหมุนแบบไปกลับ และวันเคิร์ฟไฟล์ ผลิตโดยใช้เทคโนโลยีซีไวร์ (C.Wire technology) ซึ่งมาจากบริษัทผู้จำหน่ายได้พัฒนาโลหะซีเอ็ม ไวร์ (CM wire) ร่วมกับการปรับสภาพโลหะด้วยกระบวนการอุณหภูมิศาสตร์ ด้วยวิธีการผลิตดังกล่าว ทำให้อุณหภูมิของการเปลี่ยนรูปร่างออสเทนไนต์ (Austenitic transformation temperature) ถูกปรับให้สูงขึ้น ผลักโครงสร้างของโลหะถูกปรับเรียงใหม่ ทำให้สมรรถภาพของเครื่องมือเพิ่มสูงขึ้น³² รวมทั้งไฟล์ยังมีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดให้แตกต่างกันหลายแบบ โดยบริเวณปลายไฟล์มีหน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยม และมีหน้าตัดเป็นรูปร่างแบบเอส (S-shaped) ใกล้กับทางด้าม จึงมีการศึกษาพบว่าวันเคิร์ฟไฟล์มีความต้านทานการหักสูงกว่าไฟล้นิกเกิลไทเทเนียมแบบธรรมดา หรือไฟล์ที่โลหะถูกปรับสภาพด้วยอุณหภูมิในบางยี่ห้อ³³

ค่าจำนวนรอบในการหมุนจนกระทั่งเครื่องมือหักของไฮเฟลกซ์อีเอ็มไฟล์ พบว่า มีค่าสูงที่สุดในคลองรากจำลองหนึ่งความโค้ง และในคลองรากจำลองสองความโค้ง พบว่ามีค่าสูงเป็นอันดับสองรองลงมาจากรีซีพรอคบลูไฟล์ ซึ่งผลที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ สาเหตุที่ไฮเฟลกซ์อีเอ็มไฟล์มีความต้านทานการหักเนื่องจากการล้าจากการหมุนสูง เนื่องจากโลหะถูกผลิตด้วยกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า (electro-discharge machining: EDM) ซึ่งกระบวนการนี้ทำให้โลหะมีความยืดหยุ่นสูง เพิ่มการต้านทานการแตกหักได้ดีขึ้น และไฟล์ยังเป็นชนิดซีเอ็ม ไวร์ ที่มีความยืดหยุ่นดี สามารถจดจำรูปร่างและไม่เกิดการติดตัวกลับขณะขยายคลองราก^{11,12,29}

จากการศึกษาปัจจุบัน พบว่า เรซิพรอคบลูไฟล์มีความต้านทานการหักเนื่องจากการล้าจากการหมุนสูงกว่าเวฟวันโกลด์ไฟล์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งในคลองรากจำลองหนึ่งความโค้งและสองความโค้ง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้^{11,19,34} Gündogar and Özyürek¹¹ เชื่อว่าหน้าตัดของเรซิพรอคบลูไฟล์ที่ถูกออกแบบให้หน้าตัดเป็นรูปตัวเอส (S-shaped) และกระบวนการบลูฮีททรีทเมนต์ (Blue heat-treated instruments) ทำให้ไฟล์มีความต้านทานการหักได้ดีกว่าเวฟวันโกลด์ไฟล์

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนรอบในการหมุนจนกระทั่งเครื่องมือหักในคลองรากจำลองสองความโค้ง กลับพบว่า เรซิพรอคบลูไฟล์มีค่าสูงที่สุด ตามด้วยไฮเฟลกซ์อีเอ็มไฟล์ และเวฟวันโกลด์ไฟล์ ซึ่งเป็นผลมาจากระบบการหมุนของไฟล์แบบไปกลับที่ช่วยไม่ให้ไฟล์ติดแน่นกับคลองราก Neelakantan *et al.*³⁵ ได้ทำการเปรียบเทียบความต้านทานการหักเนื่องจากการล้าจากการหมุนของวันเซปไฟล์

ซึ่งมีระบบการหมุนของไฟล์แบบทางเดียวไม่ย้อนกลับ และเรซีพรอคไฟล์ที่มีระบบการหมุนของไฟล์แบบไปกลับ ในคลองรากจำลอง ที่มีสองความโค้งด้วยวิธีพลวัตและอพลวัต ผลการศึกษาพบว่า เรซีพรอคไฟล์มีจำนวนรอบในการหมุนจนกระทั่งเครื่องมือหักสูงกว่าวันเซปไฟล์ ทั้งการทดสอบด้วยวิธีพลวัตและอพลวัต

การศึกษานี้เลือกทดสอบด้วยวิธีอพลวัต (static) ถึงแม้ว่าการทดสอบด้วยวิธีพลวัต (dynamic) จะเป็นการจำลองวิธีใช้ไฟล์ในการรักษาจริง แต่การทดสอบด้วยวิธีอพลวัตจะเป็นการจำลองการทำงานของไฟล์ที่ใช้ภายในคลองรากตลอดเวลา และทำให้เกิดหน่วยแรงคด (flexural stress) ได้สูงที่สุดที่ตำแหน่งศูนย์กลางความโค้งของคลองราก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค (microstructure) ของไฟล์²² ผลการทดสอบที่ได้เป็นค่าการใช้งานจนกระทั่งไฟล์เกิดการล้าเนื่องจากการหมุนหรือจากการบิด ช่วยให้ประเมินอายุการใช้งานของไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมได้อย่างเหมาะสม เพื่อป้องกันการหักของเครื่องมือในคลองรากได้ จึงนิยมใช้เป็นวิธีหลักในการทดสอบ

เมื่อนำไฟล์ไปตรวจสอบหลังจากการหักภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า หน้าตัดไฟล์มีบริเวณที่เป็นจุดเริ่มต้นของการหัก ซึ่งเป็นตำแหน่งของขอบคมมีด แล้วแพร่ออกไปจนกระทั่งเกิดรอยแตก ซึ่งเป็นไปได้จากการที่รูช่องว่างขนาดเล็ก (microvoid) มารวมกันมากจนทำให้เกิดความอ่อนแอของเนื้อโลหะ จนเกิดการแตกหัก ซึ่งปรากฏเป็นแอ่งตรงมิดหน้าตัดของเครื่องมือ¹⁹ และเมื่อตรวจสอบลักษณะการหักตามชนิดการหักของ Sattapan *et al.*⁴ พบว่า ไฟล์ทุกชนิดไม่พบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดการคลายเกลียว หรือเกิดการบิดของเกลียวที่ผิดทิศทาง เนื่องจากคลองรากจำลองที่ออกแบบมีขนาดใหญ่กว่าไฟล์จริงประมาณ 0.1 มิลลิเมตร ทำให้ไฟล์หมุนได้อย่างอิสระ ไม่เกิดการยึดติดกับคลองราก การหักของเครื่องมือจึงเป็นการหักเนื่องจากการล้าจากการหมุน³⁶

การศึกษานี้เป็นการศึกษาในทางห้องปฏิบัติการโดยใช้แบบจำลองคลองรากฟัน ซึ่งเป็นเพียงการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของไฟล์นิกเกิลไทเทเนียม ไม่สามารถลอกเลียนลักษณะของคลองรากของมนุษย์ที่มีความซับซ้อนในทางคลินิกได้ทั้งหมด จึงหวังว่าการศึกษานี้จะช่วยให้ทันตแพทย์พิจารณาเลือกใช้ไฟล์นิกเกิลไทเทเนียมได้เหมาะสมในงานขยายคลองรากฟันที่มีความโค้ง ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการขยายคลองรากฟันมากที่สุด และลดโอกาสการเกิดไฟล์หัก นอกจากนี้แล้ว การศึกษานี้ให้ผลแตกต่างกับการศึกษาที่ผ่านมา ซึ่งยังไม่มีข้อสรุปที่แน่ชัด โดยคาดว่ายังมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการหักของไฟล์ เช่น การออกแบบรูปร่างและหน้าตัดของไฟล์ ชนิดของโลหะ ความยืดหยุ่นของไฟล์ ค่าอุณหภูมิสิ้นสุดออกสเทนไนต์ และระบบการหมุนของไฟล์ก็มีผลต่อการต้านทานการหักเช่นเดียวกัน จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตต่อไป

สรุปผลการวิจัย

ไฮฟเลกซ์อีดีเอ็มไฟล์มีความต้านทานการหักเนื่องจากการล้าจากการหมุนสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในคลองรากจำลองหนึ่งความโค้ง และในคลองรากจำลองสองความโค้ง พบว่า เรซีพรอคบลูไฟล์มีความต้านทานการหักเนื่องจากการล้าจากการหมุนสูงที่สุด และวันเคิร์ฟไฟล์มีความต้านทานการหักเนื่องจากการล้าจากการหมุนน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

แหล่งทุน: เงินกองทุนวิจัย คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- Schilder H. Cleaning and shaping the root canal. *Dent Clin North Am* 1974;18(2):269-96.
- Yared G. Canal preparation using only one Ni-Ti rotary instrument: preliminary observations. *Int Endod J* 2008;41(4):339-44.
- Parashos P, Messer HH. Rotary NiTi instrument fracture and its consequences. *J Endod* 2006;32(11):1031-43.
- Sattapan B, Nervo GJ, Palamara JE, Messer HH. Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use. *J Endod* 2000;26(3):161-5.
- Pruett JP, Clement DJ, Carnes Jr DL. Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod* 1997;23(2):77-85.
- Zinelis S, Darabara M, Takase T, Ogane K, Papadimitriou GD. The effect of thermal treatment on the resistance of nickel-titanium rotary files in cyclic fatigue. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2007;103(6):843-7.
- Shen Y, Zhou Hm, Zheng Yf, Peng B, Haapasalo M. Current challenges and concepts of the thermomechanical treatment of nickel-titanium instruments. *J Endod* 2013;39(2):163-72.
- Peters OA, Gluskin A, Weiss R, Han J. An *in vitro* assessment of the physical properties of novel Hyflex nickel-titanium rotary instruments. *Int Endod J* 2012;45(11):1027-34.
- De-Deus G, Moreira EJ, Lopes HP, Elias CN. Extended cyclic fatigue life of F2 ProTaper instruments used in reciprocating movement. *Int Endod J* 2010;43(12):1063-8.
- Varela-Patiño P, Ibañez-Párraga A, Rivas-Mundiña B, Cantatore G, Otero XL, Martín-Biedma B. Alternating versus continuous rotation: a comparative study of the effect on instrument life. *J Endod* 2010;36(1):157-9.
- Gundogar M, Ozyurek T. Cyclic Fatigue Resistance of OneShape, HyFlex EDM, WaveOne Gold, and Reciproc Blue Nickel-titanium Instruments. *J Endod* 2017;43(7):1192-6.
- Pedullà E, Savio FL, Boninelli S, Plotino G, Grande NM, La Rosa G, *et al.* Torsional and cyclic fatigue resistance of a new nickel-titanium instrument manufactured by electrical discharge machining. *J Endod* 2016;42(1):156-9.
- Serafin M, De Biasi M, Franco V, Angerame D. *In vitro* comparison

- of cyclic fatigue resistance of two rotary single-file endodontic systems: OneCurve versus OneShape. *Odontology* 2019;107(2):196-201.
14. Micro-Mega. The One Curve Brochure [online] 2018 [cited eptember 25, 2019]. Available from: <https://www.micro-mega.com/wp-content/uploads/2018/03/Brochure-One-Curve-EN-PRINT.pdf>
15. Plotino G, Grande NM, Cordaro M, Testarelli L, Gambarini G. A review of cyclic fatigue testing of nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 2009;35(11):1469-76.
16. Al-Sudani D, Grande NM, Plotino G, Pompa G, Di Carlo S, Testarelli L, *et al.* Cyclic fatigue of nickel-titanium rotary instruments in a double (S-shaped) simulated curvature. *J Endod* 2012;38(7):987-9.
17. Kim HC, Kwak SW, Cheung GSP, Ko DH, Chung SM, Lee W. Cyclic fatigue and torsional resistance of two new nickel-titanium instruments used in reciprocation motion: Reciproc versus WaveOne. *J Endod* 2012;38(4):541-4.
18. Arens FC, Hoen MM, Steiman HR, Dietz GC, Jr. Evaluation of single-use rotary nickel-titanium instruments. *J Endod* 2003;29(10):664-6.
19. Al-Obaida MI, Merdad K, Alanazi MS, Altwaijry H, AlFaraj M, Alkhamis AA, *et al.* Comparison of cyclic fatigue resistance of 5 heat-treated nickel-titanium reciprocating systems in canals with single and double curvatures. *J Endod* 2019;45(10):1237-41.
20. Parashos P, Gordon I, Messer HH. Factors influencing defects of rotary nickel-titanium endodontic instruments after clinical use. *J Endod* 2004;30(10):722-5.
21. Spili P, Parashos P, Messer HH. The impact of instrument fracture on outcome of endodontic treatment. *J Endod* 2005;31(12):845-50.
22. Ruiz-Sánchez C, Faus-Llácer V, Faus-Matoses I, Zubizarreta-Macho Á, Sauro S, Faus-Matoses V. The Influence of NiTi Alloy on the Cyclic Fatigue Resistance of Endodontic Files. *J Clin Med* 2020;9(11):3755.
23. Jamleh A, Yahata Y, Ebihara A, Atmeh AR, Bakhsh T, Suda H. Performance of NiTi endodontic instrument under different temperatures. *Odontology* 2016;104(3):324-8.
24. De Vasconcelos RA, Murphy S, Carvalho CAT, Govindjee RG, Govindjee S, Peters OA. Evidence for reduced fatigue resistance of contemporary rotary instruments exposed to body temperature. *J Endod* 2016;42(5):782-7.
25. Dosanjh A, Paurazas S, Askar M. The effect of temperature on cyclic fatigue of nickel-titanium rotary endodontic instruments. *J Endod* 2017;43(5):823-6.
26. Grande NM, Plotino G, Silla E, Pedullà E, DeDeus G, Gambarini G, *et al.* Environmental temperature drastically affects flexural fatigue resistance of nickel-titanium rotary files. *J Endod* 2017;43(7):1157-60.
27. Shen Y, Huang X, Wang Z, Wei X, Haapasalo M. Low environmental temperature influences the fatigue resistance of nickel-titanium files. *J Endod* 2018;44(4):626-9.
28. Yao JH, Schwartz SA, Beeson TJ. Cyclic fatigue of three types of rotary nickel-titanium files in a dynamic model. *J Endod* 2006;32(1):55-7.
29. Pirani C, Iacono F, Generali L, Sassatelli P, Nucci C, Lusvardi L, *et al.* HyFlex EDM: superficial features, metallurgical analysis and fatigue resistance of innovative electro discharge machined NiTi rotary instruments. *Int Endod J* 2016;49(5):483-93.
30. De-Deus G, Vieira VTL, da Silva EJM, Lopes H, Elias CN, Moreira EJ. Bending resistance and dynamic and static cyclic fatigue life of Reciproc and WaveOne large instruments. *J Endod* 2014;40(4):575-9.
31. Lopes HP, Elias CN, Vieira MV, Vieira VT, de Souza LC, Dos Santos AL. Influence of surface roughness on the fatigue life of nickel-titanium rotary endodontic instruments. *J Endod* 2016;42(6):965-8.
32. Rashad MM, Ali AH, Ibraheem AF. Cyclic Fatigue Resistance of One Curve, Hyflex EDM and Neolix NiTi Files in Simulated Curved Canals. *Indian J. Public Health* 2020;11(02):2497.
33. Elnaghy AM, Elsaka SE. Cyclic Fatigue Resistance of One Curve, 2Shape, ProFile Vortex, Vortex Blue, and RaCe Nickel-Titanium Rotary Instruments in Single and Double Curvature Canals. *J Endod* 2018;44(11):1725-30.
34. Keskin C, Inan U, Demiral M, Keleş A. Cyclic fatigue resistance of Reciproc Blue, Reciproc, and WaveOne Gold reciprocating instruments. *J Endod* 2017;43(8):1360-3.
35. Neelakantan P, Reddy P, Gutmann JL. Cyclic fatigue of two different single files with varying kinematics in a simulated double-curved canal. *J Investig Clin Dent* 2016;7(3):272-7.
36. Plotino G, Grande NM, Mazza C, Petrovic R, Testarelli L, Gambarini G. Influence of size and taper of artificial canals on the trajectory of NiTi rotary instruments in cyclic fatigue studies. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2010;109(1): e60-e6.