

ข้อจำกัดของการวินิจฉัยกล้ามเนื้อและเส้นประสาทส่วนปลาย ด้วยเส้นโค้งเอส-ดีในงานกายภาพบำบัด

The Limitations of Strength Duration Curve as Electrodiagnostic Tool for Muscle and Peripheral Nerve in Physical Therapy

ธฤตธวัชร ไชยโคตร*

บทคัดย่อ

เส้นโค้งเอส-ดี ถูกนำมาใช้วินิจฉัยและรักษา ในผู้ป่วยที่มีความผิดปกติของกล้ามเนื้อและเส้นประสาท ส่วนปลายอย่างกว้างขวางในงานกายภาพบำบัด เนื่องจาก เป็นวิธีที่ประหยัดกว่าวิธีการทดสอบความเร็วในการ นำกระแสประสาทของเส้นประสาทส่วนปลาย และวิธี ทดสอบสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อ เส้นโค้งเอส-ดี เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแรง ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นเนื้อเยื่อ ในระดับที่ สามารถทำให้เกิดการตอบสนองได้ และช่วงกระตุ้นที่ ปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เนื้อเยื่อ เพื่อแสดงคุณลักษณะ ของกล้ามเนื้อและเส้นประสาท แม้ว่าหลักการทาง

ประสาทสรีรวิทยาของเส้นโค้งเอส-ดีได้ถูกสร้างขึ้นและ เผยแพร่มานานแล้วก็ตาม แต่ยังมีปัจจัยหลายประการ ที่มีผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือ และความเที่ยงตรง ของการหาค่าโครแนกซ์ ซึ่งได้แก่ รูปร่างกระแสไฟ ชั่วกระตุ้น ความต้านทานของกระแส ความแตกต่าง ของเนื้อเยื่อ และอุณหภูมิ ในทางปฏิบัติ นักกายภาพ บำบัดควรใช้ไฟรูปร่างสี่เหลี่ยมกระตุ้นด้วยขั้วลบ ที่ส่งจากแหล่งผลิตแบบกระแสไฟคงที่ และต้อง ทดสอบกล้ามเนื้อหลายมัดที่เลี้ยงโดยเส้นประสาทนั้นๆ เพื่อให้ได้เส้นโค้งเอส-ดีที่น่าเชื่อถือมากที่สุด

Abstract

The strength duration curve or S-D curve is widely used in physical therapy for diagnosis and treatment of muscle and peripheral nerve injury patients. Since it costs less than the nerve conduction velocity test and other electromyography procedures. The S-D curve is a logarithm plot of the threshold current versus pulse duration required

to stimulate excitable tissue which represent the integrity of the muscle and nerve complex. Although the neurophysiological basis for the S-D curve has been established and published long ago, there are many factors that affect the reliability and validity of chronaxie measurement such as stimulus waveform, electrode

*อาจารย์ประจำ สำนักวิชากายภาพบำบัด คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยคริสเตียน

characteristics, stimulator output impedance, tissue inhomogeneity and temperature. In practice, physical therapist should obtain with a cathode

rectangular pulse delivered from a constant-current stimulator and also test the given nerve supply to various muscles for the most reliable S-D curve.

เส้นโค้งเอส-ดี หรือ strength duration curve หรือ intensity/time curve เป็นกราฟล็อกกาลีทึม (Logarithm) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแรงของกระแสไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้นเนื้อเยื่อที่ระดับซึ่งทำให้เกิดการตอบสนองได้ และช่วงเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าไปกระตุ้น เส้นโค้งเอส-ดี และการหาค่าโครเนกซ์ถูกนำมาใช้วินิจฉัยทางไฟฟ้าต่อระบบประสาทส่วนปลายอย่างกว้างขวางตั้งแต่ปีคริสต์ศักราช 1930 จนกระทั่งมีการค้นพบการทดสอบหาค่าความไวของเส้นประสาท (Nerve conduction test ; NCV) และการวัดสัญญาณกล้ามเนื้อและเส้นประสาท (Electromyography; EMG) ซึ่งเป็นค่าที่น่าเชื่อถือมากกว่า ในช่วงนั้นนิยมนำเส้นโค้งเอส-ดีมาใช้หาตำแหน่ง ความรุนแรงของโรค การทำนายการเกิดแผลเนื้อเยื่อ และการฟื้นฟูของมอเตอร์และเส้นประสาทส่วนปลาย โดยข้อมูลของเส้นโค้งเอส-ดีถูกจำกัดอยู่ในใยกล้ามเนื้อที่ตอบสนองต่อตัวกระตุ้นเท่านั้น ถ้าต้องการข้อมูลที่มีค่าความน่าเชื่อถือได้ ต้องทดสอบกล้ามเนื้อหลายๆ มัดที่เลี้ยงโดยเส้นประสาทนั้นๆ

การวินิจฉัยกล้ามเนื้อและเส้นประสาทด้วยเส้นโค้งเอส-ดี

จากเส้นโค้งเอส-ดี พบว่า ช่วงกระตุ้นที่ยาวมากกว่า 1 มิลลิวินาที มักจะทำให้เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อปกติที่มีเส้นประสาทมาเลี้ยงด้วยความเข้มของกระแสไฟฟ้าเท่าเดิมทุกช่วงเวลา แต่ถ้าช่วงกระตุ้นที่แคบกว่า 1 มิลลิวินาที ที่จะทำให้เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อ จะต้องใช้ความเข้มของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งความเข้มของกระแสที่ระดับนี้คือจำนวนประจุที่น้อยที่สุดเคลื่อนผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ก่อให้เกิดพลังประสาท (Nerve impulse)

การใช้กระแสไฟฟ้ากระตุ้นเนื้อเยื่อที่มีการตอบสนองต่อสิ่งเร้าเพื่อให้เกิดการเกิดแอคชั่นโพเทนเชียล (Action potential) แอคชั่นโพเทนเชียลขึ้นกับความแรงของกระแสไฟฟ้า และช่วงกระตุ้น ซึ่งความแรงของกระแสไฟฟ้าต้องสูงถึงระดับตอบสนองเพื่อทำให้เกิดการร้าวของเยื่อหุ้มเซลล์ และช่วงกระตุ้นต้องยาวกว่าระยะเวลาในการเก็บประจุของเยื่อหุ้มเซลล์ด้วยความแรงของกระแสไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้นและระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นนั้นเป็นปฏิภาคกลับซึ่งกันและกัน คือถ้าใช้ความเข้มของกระแสไฟฟ้าสูง เวลาที่ใช้กระตุ้นจะสั้น ถ้าใช้ความเข้มของกระแสไฟฟ้าน้อยต้องใช้เวลากะตุ้นนานขึ้น แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่ว่าจะใช้กระแสไฟฟ้ามากเท่าใดก็ตามก็ต้องใช้เวลากระตุ้นจำกัดเวลาหนึ่ง ซึ่งถ้าน้อยกว่านี้ไม่ได้ เพราะจะไม่มี การตอบสนองเช่นกัน ค่าที่มีความสำคัญที่ได้จากเส้นโค้งเอส-ดีมี 3 ค่าด้วยกัน คือรีโอเบส (Rheobase) ช่วงระยะเวลาที่เหมาะสม (Utilization time) ค่าโครเนกซ์ (Chronaxie) ซึ่งทั้งสามค่านำมาใช้แสดงความไวของกล้ามเนื้อและเส้นประสาทได้

รีโอเบส เป็นค่าความเข้มของกระแสไฟฟ้าที่น้อยที่สุดที่สามารถกระตุ้นให้เกิดการตอบสนอง โดยไม่จำกัดช่วงเวลาโดยความแรงของกระแสไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่ารีโอเบส จะไม่สามารถร้าวไปประสาทในทุกช่วงกระตุ้นในการหาค่า รีโอเบส รูปร่างของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ต้องเป็นไฟรูปร่างสามเหลี่ยมเสมอ และค่าที่ได้มีหน่วยเป็นโวลต์ หรือ มิลลิแอมแปร์ การหาค่ารีโอเบส โดยการวางขั้วลบบนจุดประสาทยนต์ (Motor point) หรือใช้ขั้วกระตุ้น 2 ขั้ว (Bipolar) วางคร่อมจุดประสาทยนต์ คาบปกติที่แวดส์เวิร์ท (Wadsworth) กล่าวอ้างถึงจะอยู่ในช่วง 2 - 18 มิลลิแอมแปร์ หรือ 5- 35 โวลต์ ค่ารีโอเบส จะเปลี่ยนแปลง ไม่คงที่ เนื่องจากปัจจัยต่างๆ ดังนั้นคือ ความต้านทานที่ผิวหนัง บวม อักเสบ

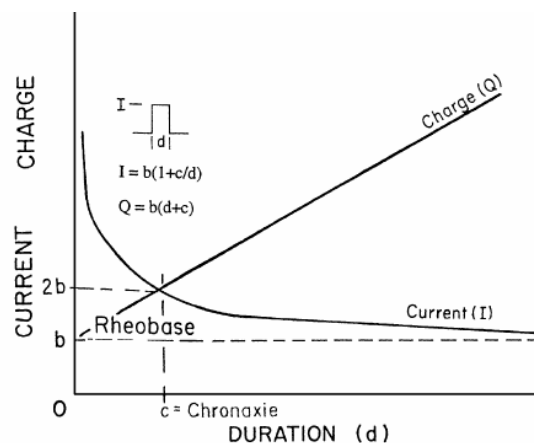
วารสารมหาวิทยาลัยคริสเตียน

ปีที่ ๑๘ ฉบับที่ ๑ (มกราคม - เมษายน) ๒๕๕๕

ความหนาของชั้นไตผิวหนัง และการเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิ

จากรูปที่ 1 โครเนกซ์ (c) เป็นช่วงกระตุ้น ที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการกระตุ้นจนทำให้เกิดการตอบสนองของเนื้อเยื่อ โดยใช้ความเข้มของกระแสไฟที่มีค่าเป็น 2 เท่าของรีโอเบส (b) ค่าโครเนกซ์ของเส้นประสาทจะสั้น และมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิวินาที ขณะที่โครเนกซ์ของกล้ามเนื้อจะยาวกว่าหรือมากกว่า 1 มิลลิวินาที โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการลาพิค (Lapicque) เท่ากับ $I = b (1 + c/d)$ โดยที่ d

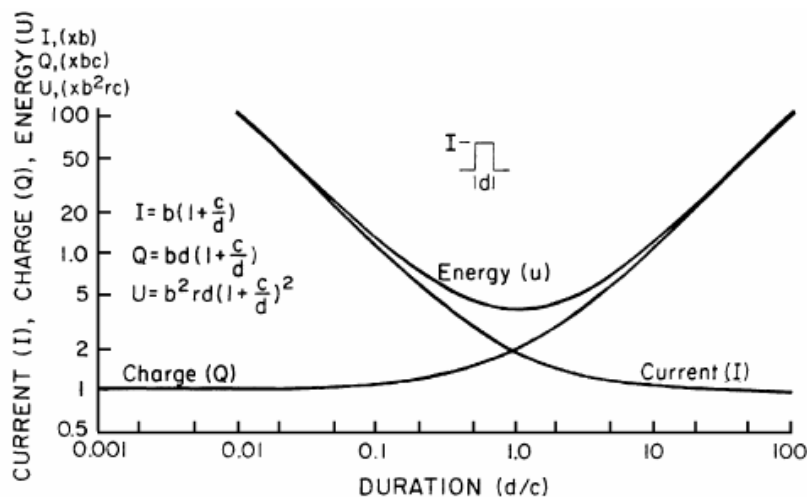
หมายถึง ช่วงกระตุ้น (Pulse duration) อย่างไรก็ตามในการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจะมีพลังงาน (Energy) และ ประจุ (Charge) โดยการกระตุ้นเนื้อเยื่อที่ใช้พลังงานที่น้อยที่สุดจะมีช่วงกระตุ้นที่เท่ากับ โครเนกซ์ ประจุที่น้อยที่สุด (bc) จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อใช้ช่วงกระตุ้นที่แคบที่สุด โดยปัจจัยที่มีผลต่อค่าโครเนกซ์มี 5 ปัจจัยได้แก่ 1) รูปลักษณ์ของกระแสไฟที่ใช้กระตุ้น 2) คุณสมบัติของขั้วกระตุ้น (Electrode) 3) แรงต้านทานกระแสของเนื้อเยื่อ 4) ความแตกต่างกันของเนื้อเยื่อในตำแหน่งกระตุ้น 5) อุณหภูมิ



รูปที่ 1 แสดงเส้นโค้งเอส-ดีไฮเปอร์โบลิคของลาพิค (ที่มา : Geddes L.A.(2004). IEEE transactions on biomedical engineering, 51(1) : 176-181)

เมื่อใช้กระแสไฟคงที่ (Constant current) รูปลักษณ์สี่เหลี่ยม (Rectangular) พบว่า ต้องใช้ประจุ ($Q = Id$) เพิ่มขึ้นโดยมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับ ช่วงกระตุ้น จากรูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ประจุและช่วงกระตุ้น หรือ Weiss charge -

duration relationship ซึ่งเป็นที่น่าสนใจที่ประจุ ในสมการของลาพิค ($Q = bd + bc$) เป็นเส้นตรงกับ ช่วงกระตุ้น (d) ซึ่งมีความชันเท่ากับ b มีจุดตัดกันที่ bc ซึ่งมีจุดที่ประจุน้อยที่สุด ดังนั้น ทั้งเวสส์ และลาพิคจึงให้ผลที่เหมือนกัน



รูปที่ 2 แสดงเส้นโคจเอส-ดีแบบล็อกกาลีทิมที่แสดงพลังงานของกระแสและประจุ (ที่มา : Geddes L.A.(2004). IEEE transactions on biomedical engineering, 51(1) : 176 – 181)

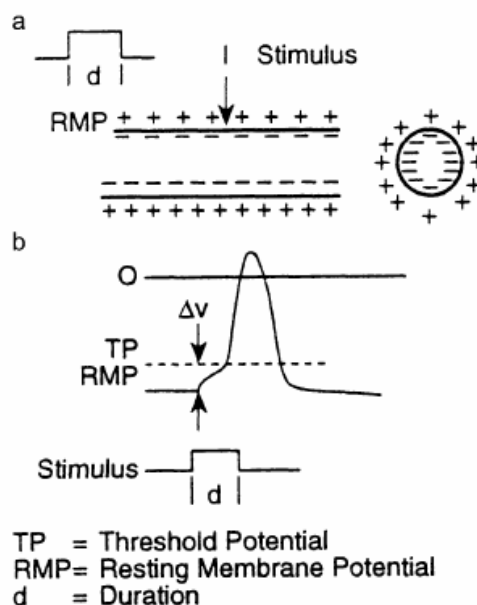
เส้นโคจเอส-ดีเกิดจากการแบ่งแกนช่วงกระตุ้นด้วยโครเนกซ์และพล็อตกระแส ประจุ และพลังงานต่อช่วงกระตุ้น ดังรูปที่ 2 ซึ่งทำให้ทราบค่าพลังงานที่น้อยที่สุดในลูกคลื่นโดยที่ช่วงกระตุ้นเท่ากับค่าโครเนกซ์

ปัจจัยที่มีผลต่อความน่าเชื่อถือของค่าโครเนกซ์

เป็นที่ทราบแน่ชัดว่า การใช้ขั้วลบกระตุ้นด้วยกระแสไฟรูปลิ้นสี่เหลี่ยมจะทำให้ประจุไฟฟ้ากระตุ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ประจูดังกล่าวต้องเอาชนะแรงต้านทานของผิวหนังเพื่อให้เกิดการแพร่ของสัญญาณกระตุ้นไปยังเนื้อเยื่อ หรือในขณะที่เซลล์ถูกกระตุ้น เซลล์จะมีแรงต้านการเปลี่ยนแปลงประจุ

ดังนั้นการตอบสนองของกระแสไฟที่ใช้กระตุ้นจะลดลงที่ความแรงของกระแสไฟเท่าเดิม หรือที่เรียกว่าเนื้อเยื่อเกิดความเคยชินกับกระแสไฟกระตุ้น ดังนั้นเพื่อให้เกิดการกระตุ้นอย่างต่อเนื่อง จึงต้องเพิ่มความแรงของกระแสไฟกระตุ้นขึ้น

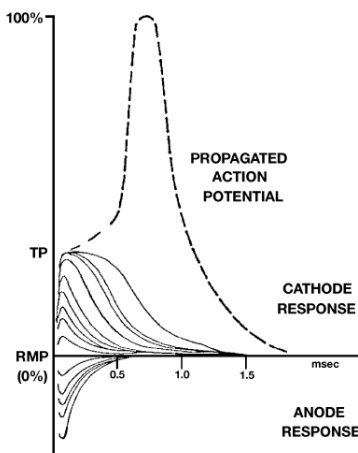
การใช้กระแสไฟรูปลิ้นสี่เหลี่ยมกระตุ้นด้วยขั้วกระตุ้นเดี่ยวขนาดเล็ก ซึ่งเป็นขั้วลบ กระแสจะไหลผ่านไปยังขั้วขนาดใหญ่ (ไม่ใช่ขั้วกระตุ้น) ดังรูปที่ 3 a เพื่อให้ศักย์ไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ลดลง ประจวบจะถูกย้ายออกไปด้วยการกระตุ้นไฟขั้วลบ ในกรณีกระแสไฟรูปลิ้นสี่เหลี่ยม ประจุ (Q) จะเท่ากับผลคูณของกระแสและช่วงกระตุ้น หรือ $Q = Id$



รูปที่ 3 แสดงการกระตุ้นด้วยกระแสไฟรูปลี่เหลี่ยมจัลรอบเซลล์ทรงกลม
(ที่มา : Geddes L.A.(2004). IEEE transactions on biomedical
engineering, 51(1) : 176-181)

ในการศึกษาการใช้กระแสไฟกระตุ้นถึงระดับ
ตอบสนองด้วยไฟจัลบวกและจัลลบ ฮอกกิน พบว่า การ
กระตุ้นไฟจัลลบด้วยการค่อยๆ เพิ่มความเข้มของกระแส
ขึ้นเรื่อยๆ แต่ต่ำกว่าระดับตอบสนองของเนื้อเยื่อ
พบว่าศักย์ไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ลดลง และกลับเข้าสู่
ระยะพักด้วยระยะเวลาคงที่ และหากใช้กระแสไฟ
จัลลบที่แรงมากเกินไป จะทำให้เกิดการตอบสนองและ
มีการแพร่กระจายของแอกชั่นโพเทนเชียลต่อไป

ในการกระตุ้นด้วยไฟจัลบวก ศักย์ไฟฟ้าของเยื่อหุ้ม
เซลล์เพิ่มขึ้น และจะกลับมาสู่ระยะพักด้วยระยะเวลา
คงที่ ถ้าเพิ่มความเข้มของกระแสไฟจัลบวกขึ้นเรื่อยๆ
จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์เพิ่มขึ้นชั่วครา
อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มความเข้มของกระแสไฟจัลบวก
ขึ้นเรื่อยๆ ก็ไม่สามารถทำให้เกิดการแพร่กระจายของ
แอกชั่นโพเทนเชียลได้ (Hodgkin,1939)



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าเฉพาะจุด (Local potential) ภายใต้ขั้วลบและขั้วบวก ขณะที่มีการเพิ่มความเข้มของกระแสไฟ หมายถึง : ภายใต้ขั้วลบ เมื่อลดความเข้มของกระแสไฟลง ศักย์ไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์จะเปลี่ยนแปลงจากระยะพักเป็นระยะถูกกระตุ้นและตอบสนอง ในขณะที่จะไม่พบการถูกกระตุ้นและตอบสนองภายใต้ขั้วบวก เมื่อเพิ่มความเข้มของกระแสไฟให้มากขึ้น (ที่มา : Geddes L.A.(2004).

IEEE Transactions on biomedical engineering, 51(1) : 176-181)

1. รูปลักษณ์ของกระแสไฟที่ใช้กระตุ้น

เป็นที่ทราบแน่ชัดว่า หากเพิ่มความเข้มของกระแสไฟรูปลักษณ์ที่เปลี่ยนด้วยขั้วลบอย่างรวดเร็วจะให้ประจุที่เพียงพอต่อการกระตุ้นอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม เซลล์ก็พยายามที่จะรักษาความค่าศักย์ไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ไว้ไม่ให้เปลี่ยนแปลงไป การกระตุ้นด้วยไฟฟ้าที่ยาวนานจะทำให้เซลล์ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว นั่นหมายความว่า หากต้องการให้เซลล์ตอบสนองต่อการกระตุ้นต้องใช้ระดับความเข้มของกระแสไฟที่มากขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่าความเคยชินต่อกระแสกระตุ้น โดยทั่วไปขั้วลบจะเล็กกว่าขั้วบวก หากวางขั้วลบอยู่ห่างจากเนื้อเยื่อที่ไวต่อการกระตุ้น คาร์โอเบสจะสูงขึ้น รูปร่างเส้นโค้งเอส-ดีไม่เปลี่ยนแปลง แต่จะอยู่บนเส้นโค้งเอส-ดีที่ได้จากการกระตุ้นไกลเนื้อเยื่อที่ไวต่อการกระตุ้น (Hill A.V., 1935)

การเปรียบเทียบการกระตุ้นด้วยกระแสไฟรูปลักษณ์ที่เปลี่ยนกับรูปลักษณ์คาปาซิเตอร์ ดิสชาร์จ (Capacitor discharge pulse) โดยทั้งสองรูปลักษณ์ถูกส่งกระแสมาจากเครื่องกระตุ้นชนิดกระแสคงที่ (Constant current stimulator) จากการศึกษาในมนุษย์พบว่าค่าโคเรเนกซ์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยแผ่นกระตุ้นชนิดติดผิวหนัง (Skin-surface electrodes) มีความแตกต่างกัน ประจุที่ได้จากกระแสไฟรูปร่างสี่เหลี่ยมเท่ากับ I_d และที่ได้จากรูปลักษณ์คาปาซิเตอร์ ดิสชาร์จ เท่ากับ IT (I คือกระแสสูงสุด และ T คือเวลาคงที่) พบว่าเวลาที่ใช้ในกระแสลดลงกว่าร้อยละ 37 เมื่อเทียบกับค่าสูงสุด และค่าโคเรเนกซ์ที่ได้จากรูปลักษณ์คาปาซิเตอร์ ดิสชาร์จ สูงกว่าประมาณสองเท่าของค่าโคเรเนกซ์ที่ได้จากกระแสไฟรูปร่างสี่เหลี่ยม นอกจากนี้ อัตราส่วนของระดับกระตุ้นสูงสุดที่ได้จากรูปลักษณ์คาปาซิเตอร์ ดิสชาร์จ เทียบกับ

กระแสไฟรูปลี่เหลี่ยมจะสูงขึ้นในขณะที่ช่วงกระตุ้นต่ำลง ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าลักษณะของรูปคลื่นที่ใช้กระตุ้นเป็นปัจจัยความสำคัญ (Wessale et al., 1992)

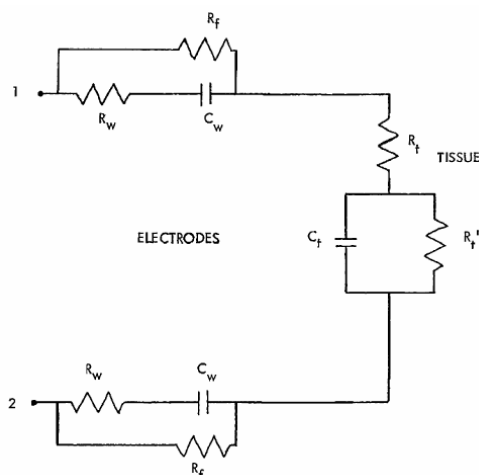
2. ลักษณะของพัลส์กระตุ้น

พัลส์กระตุ้นจะวางระหว่างเนื้อเยื่อกับเครื่องกระตุ้น การกระตุ้นจะเกิดขึ้นที่ขั้วลบ เนื่องจากโดยทั่วไปขั้วลบจะมีขนาดเล็กกว่าขั้วบวก ทำให้ความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่หน้าตัดที่กระตุ้นเนื้อเยื่อมากกว่าขั้วบวก พบว่าหากวางขั้วลบอยู่ห่างจากตำแหน่งกระตุ้น ค่ารีโอเบสจะมากขึ้น รูปร่างของเส้นโค้งเอสดีไม่เปลี่ยนแปลงแต่จะวางตัวอยู่สูงกว่าเส้นโค้งเอสดีที่เกิดจากการวางพัลส์กระตุ้นใกล้ตำแหน่งกระตุ้น

วงจรไฟฟ้าของพัลส์กระตุ้น-เนื้อเยื่อ ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบได้แก่ฮาล์ฟเซลล์โพเทนเทียล (Half-cell potential) ความต้านทานที่ผิว และตัวเก็บประจุ โดยปกติการกระตุ้นเนื้อเยื่อนั้น ถือว่าค่า

ฮาล์ฟเซลล์โพเทนเทียล ไม่ต้องคำนึงก็ได้ วงจรไฟฟ้าอย่างง่ายของพัลส์กระตุ้น-เนื้อเยื่อ ดังแสดงในรูปที่ 10 ในทางปฏิบัติ หากต้องการลดความบิดเบือนของรูปคลื่นที่เกิดจากพัลส์กระตุ้น ต้องใช้เครื่องกระตุ้นที่ให้กระแสไฟที่ค่าผ่านความต้านทานสูง (High output impedance) ซึ่งได้แก่ เครื่องกระตุ้นแบบกระแสคงที่ (Constant-current stimulator)

สิ่งที่มีความสำคัญอีกประการคือ รูปทรงของพัลส์กระตุ้น พัลส์กระตุ้นทุกรูปทรงยกเว้นพัลส์กระตุ้นทรงกลมจะให้ความหนาแน่นของกระแสที่ไม่สม่ำเสมอ โดยพบว่าส่วนขอบของพัลส์กระตุ้นจะมีความหนาแน่นของกระแสที่สูงกว่าบริเวณศูนย์กลาง (Caruso et al., 1979; Overmeyer et al., 1979) ดังนั้นการกระตุ้นจึงเกิดขึ้นได้ขอบของพัลส์กระตุ้นซึ่งเป็นตำแหน่งที่กระแสไฟขั้วลบหนาแน่นที่สุดนั่นเอง

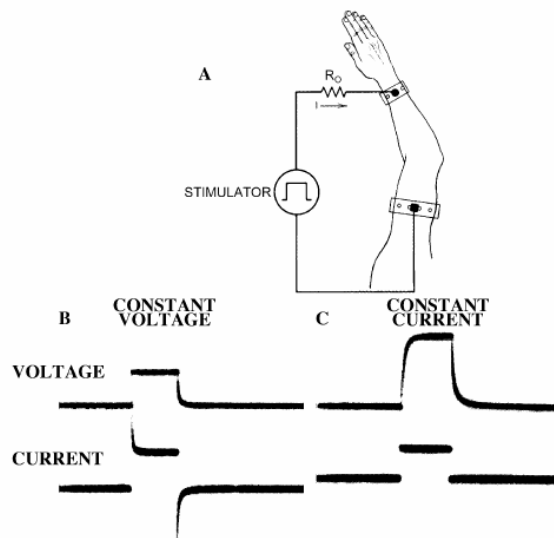


รูปที่ 5 แสดงการวางพัลส์กระตุ้น 2 ตำแหน่งที่ผิวหนังผู้ถูกทดลอง R_w คือ Walburge resistance C_w คือ Walburge capacitance R_f คือ Faradic resistance R_t , R_t' และ C_t เป็นค่าความต้านทานและค่าเก็บประจุของผู้ถูกทดสอบ โดยความต้านทานเกิดจากสารน้ำในเนื้อเยื่อ และค่าเก็บประจุเกิดจากเยื่อหุ้มเซลล์ (ที่มา : Geddes L.A.(2004). IEEE transactions on biomedical engineering, 51(1) : 176-181)

3. ความต้านทานของกระแสที่ออกจากเครื่องกระตุ้น

ความต้านทานของกระแสที่ออกมาจากเครื่องกระตุ้นมีผลอย่างมากต่อรูปร่างของคลื่นกระตุ้น โดยทั่วไปวงจรกระแสไฟส่งออกแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ 1) ค่ายไฟฟ้าคงที่ (Constant voltage) และ 2) กระแสไฟคงที่ (Constant current) ถ้าค่ายไฟฟ้าส่งออกมีค่าคงที่ทุกเนื้อเยื่อที่ถูกกระตุ้น ความต้านทานส่งกระแสไฟส่งออกจะต่ำ ในเครื่องกระตุ้นแบบกระแสไฟคงที่ กระแสไฟจะเท่าเดิมไม่

เปลี่ยนแปลงแม้เนื้อเยื่อจะมีความแตกต่างกันก็ตาม ค่าความต้านทานกระแสไฟส่งออกจะสูง อย่างไรก็ตาม เครื่องกระตุ้นแบบค่ายไฟฟ้าคงที่ รูปร่างของคลื่นไฟฟ้าจะไม่เหมือนกับรูปร่างของค่ายไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับความต้านทานของเนื้อเยื่อ และขั้วกระตุ้น หากกระตุ้นด้วยเครื่องกระตุ้นแบบกระแสไฟคงที่ รูปร่างของค่ายไฟฟ้าจะไม่เหมือนกับรูปร่างของกระแสไฟฟ้า เนื่องจากกระแสดังกล่าวได้ขับเคลื่อนประจุบวกจากอิเล็กโทรดเพื่อทำให้เกิดการกระตุ้นเกิดขึ้น



รูปที่ 6 รูปบนแสดงการกระตุ้นด้วยกระแสไฟรูปร่างสี่เหลี่ยมซึ่งมีค่าต้านทานกระแสส่งออก (R_o) เชื่อมต่อไปยังขั้วกระตุ้นในบริเวณต้นแขน รูปล่างซ้ายแสดงรูปร่างของค่ายไฟฟ้าและรูปร่างของกระแสที่ได้จากการกระตุ้นด้วยเครื่องกระตุ้นชนิดค่ายไฟฟ้าคงที่ พบว่าค่าความต้านทานกระแสส่งออกจะเล็ก รูปล่างขวาแสดงรูปร่างของค่ายไฟฟ้าและรูปร่างของกระแสที่ได้จากการกระตุ้นด้วยเครื่องกระตุ้นชนิดกระแสไฟคงที่ พบว่าค่าความต้านทานกระแสส่งออกจะใหญ่ (ที่มา : Geddes L.A.(2004). IEEE transactions on biomedical engineering, 51(1) : 176-181)

4. ความแตกต่างของลักษณะเนื้อเยื่อ

ในการวางขั้วกระตุ้นเพื่อหาค่าโครเน็กซ์ เป็น การอนุมานว่าเนื้อเยื่อที่ใช้กระตุ้นมีลักษณะทางชีวไฟฟ้า เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงเนื้อเยื่อ

แต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางชีวไฟฟ้าแตกต่างกันออกไป ดังนั้นตำแหน่งที่ใช้กระตุ้นจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เช่น หากวางขั้วกระตุ้นบนกล้ามเนื้อลายและการหดตัวของกล้ามเนื้อเป็นตัวบ่งชี้ถึงการตอบสนองต่อกระแสไฟ

วารสารมหาวิทยาลัยคริสเตียน

ปีที่ ๑๘ ฉบับที่ ๑ (มกราคม - เมษายน) ๒๕๕๕

ค่าโครเนกซ์ที่ได้จะเป็นค่าของเส้นประสาทชนิดซึ่งเลี้ยงกล้ามเนื้อนั้นๆ ในการหาค่าโครเนกซ์ของกล้ามเนื้อเพียงอย่างเดียว จำเป็นต้องยับยั้งเส้นประสาทที่เลี้ยงกล้ามเนื้อนั้นก่อน ในความเป็นจริงแล้ว มีเนื้อเยื่อ 3 ชนิดที่ถูกกระตุ้นในกล้ามเนื้อลาย ซึ่งแต่ละชนิดก็มีค่าโครเนกซ์แตกต่างกันออกไป 1) เส้นประสาทยนต์ 2) เนื้อเยื่อรอยประสานระหว่างกล้ามเนื้อและเส้นประสาท (Myoneural junction) และ 3) โยของกล้ามเนื้อลาย ในการวินิจฉัยการบาดเจ็บของเส้นประสาทยนต์และการออกของเส้นประสาทมาเลี้ยงกล้ามเนื้อจึงต้องตรวจวัดค่าโครเนกซ์เป็นระยะเวลากลายเดือน หลังจากที่เส้นประสาทได้รับการบาดเจ็บ ค่าโครเนกซ์จะสูงขึ้น ซึ่งเป็นค่ากล้ามเนื้อที่ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยงนั่นเอง ในระยะที่เริ่มมีเส้นประสาทงอกมาเลี้ยงกล้ามเนื้อ ค่าโครเนกซ์จะน้อยลง และจะน้อยที่สุดเมื่อเส้นประสาทมาเลี้ยงกล้ามเนื้ออย่างสมบูรณ์ (Ritchie A. and Smith C.R., 1944)

ในการหาค่าโครเนกซ์ของเส้นประสาท สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือเส้นประสาทส่วนใหญ่จะมีปมประสาทที่มีขนาดหน้าตัดแตกต่างกันออกไป ซึ่งจะมีผลทำให้ความเร็วของการแพร่กระจายของแอกซอนโพเทนเชียลแตกต่างกันออกไปด้วย (Gasser H.S. and Erlanger J., 1922; Gasser H.S. and Erlanger J., 1927;) ทำให้แต่ละเส้นใยประสาทจะมีค่าโครเนกซ์ที่แตกต่างออกไปด้วยเช่นกัน ดังนั้นการกระตุ้นเส้นประสาทจะต้องใช้ช่วงกระตุ้นที่ยาวมากพอ และความเข้มของกระแสไฟฟ้าที่มากพอที่จะกระตุ้นเส้นประสาทต่างๆ เพื่อทำให้เกิดแอกซอนโพเทนเชียลได้

อย่างไรก็ตาม ในเนื้อเยื่อที่มีคุณสมบัติทางชีวไฟฟ้าที่หลากหลาย ขนาดของช่วงกระตุ้นและตำแหน่งในการวางช่วงกระตุ้นจึงเป็นปัจจัยในการหาค่าโครเนกซ์เช่นกัน (Irnich W., 1980) จากการศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่า ตำแหน่งการวางขั้วสามารถจำแนกค่าโครเนกซ์ของกล้ามเนื้อและเส้นประสาทได้ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าตำแหน่งการวางขั้วกระตุ้นจะมีผลต่อค่าโครเนกซ์มากกว่าขนาดของช่วงกระตุ้น (Lucas K., 1906)

5. อุณหภูมิ

เป็นที่ทราบกันดีว่า อุณหภูมิมีผลต่อการเกิดขบวนการเมตาบอลิซึมที่เกิดขึ้นในเซลล์ เช่นเดียวกันกับการหาค่าโครเนกซ์ ซึ่งขึ้นอยู่กัอุณหภูมิเช่นเดียวกัน จากการศึกษาเพื่อหาค่าโครเนกซ์ที่ผ่านๆ มา คณะผู้วิจัยจะตระหนักถึงผลของความร้อนที่อาจกระทบต่อค่าโครเนกซ์ (Geddes L.A. and Bourland J.D., 1985; Geddes L.A. and Bourland J.D., 1985; Lapicque L., 1907) จากการศึกษาในสุนัขพบว่า หากอุณหภูมิร่างกายต่ำกว่า 23 องศาเซลเซียส ค่าโครเนกซ์จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.9 ต่อการลดลงของอุณหภูมิกาย 1 องศาเซลเซียส ดังนั้นการหาค่าโครเนกซ์จึงจำเป็นต้องระบุอุณหภูมิกายด้วยทุกครั้ง

จากการศึกษาล่าสุดพบว่า ปัจจัยทั้ง 5 ประการที่กล่าวมาข้างต้นนี้มีผลต่อความแม่นยำของค่าโครเนกซ์ซึ่งในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมมีค่าโครเนกซ์ของกล้ามเนื้อหัวใจห้องล่างที่อุณหภูมิกายปกติ อยู่ระหว่าง 0.5 มิลลิวินาทีในมนุษย์ 2.0 ถึง 4.1 มิลลิวินาทีในสุนัข ซึ่งการศึกษาดังกล่าว ใช้ขนาดช่วงกระตุ้นที่แตกต่างกันและไม่ทราบค่าความต้านทานของกระแสส่งออกจากร่างกระตุ้น (Geddes L.A., 1999)

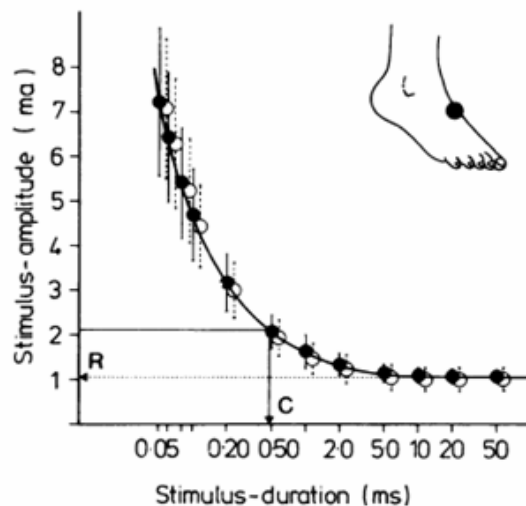
ค่าโครเนกซ์ของเส้นประสาทหับความรู้สึกร่างกายของมนุษย์มีค่าระหว่าง 0.35 ถึง 1.17 มิลลิวินาที ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนคือ $1.17/0.35$ เท่ากับ 3.3 อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวยังมีความแปรปรวนอยู่ ค่าโครเนกซ์ในกล้ามเนื้อลายที่ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยงมีค่าระหว่าง 9.5 ถึง 30 มิลลิวินาที ณ อุณหภูมิกายปกติ ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วน 3.16 และพบว่าค่าโครเนกซ์จะลดลงหากเริ่มมีเส้นประสาทมาเลี้ยง (Ritchie A. and Smith C.R., 1944) ในทางปฏิบัติหากต้องการหาค่าโครเนกซ์ในกล้ามเนื้อและเส้นประสาท ณ อุณหภูมิใดๆ ต้องหาจากกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยด้วยขั้วลบซึ่งเป็นการกระตุ้นแบบกระแสไฟคงที่

ควรเลือกกระแสไฟรูปร่างสี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยมเพื่อหาค่าโครเนกซ์

เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของกระแสไฟกับช่วงกระตุ้น หากความเข้มของกระแสที่น้อยเกินไปจะไม่สามารถทำให้เกิดแอกชั่นโพเทนเชียลได้ แม้ว่าจะใช้ช่วงกระตุ้นที่ยาวเท่าใดก็ตาม ความเข้มของกระแสไฟที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดแอกชั่นโพเทนเชียลหรือการหดตัวของกล้ามเนื้อที่น้อยที่สุด เรียกว่ารีโอเบส ซึ่งการหดตัวที่น้อยที่สุดในทางกายภาพบำบัดคือ มีการหดตัวของกล้ามเนื้อหรือกลุ่มกล้ามเนื้อที่สามารถมองเห็นด้วยตาหรือด้วยการคลำ และช่วงกระตุ้นที่เป็นสองเท่าของรีโอเบสคือโครเนกซ์

(รูปที่ 7) โดยการวาดเส้นโค้งเอส-ดี และหาค่าโครเนกซ์ มีวัตถุประสงค์ 3 ประการคือ

1. เพื่อทราบระดับความรุนแรงของการบาดเจ็บของเส้นประสาทส่วนปลาย โดยเส้นโค้งเอส-ดีสามารถบอกได้ว่ากล้ามเนื้อมัดนั้นๆ มีกล้ามเนื้อมาเลี้ยงปกติ ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยงบางส่วน หรือ ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยงอย่างสมบูรณ์
2. เพื่อทราบช่วงกระตุ้น ความถี่ และความเข้มของกระแสที่เหมาะสมที่จะให้กับผู้ป่วย
3. เพื่อทราบระยะเวลาฟื้นตัวของเส้นประสาทหลังการบาดเจ็บ



รูปที่ 7 แสดงเส้นโค้งเอส-ดี โดยปกติค่ารีโอเบส (R) จะแปรผันตามกล้ามเนื้อแต่ละมัด ในภาพจากการกระตุ้นกล้ามเนื้อหน้าเท้ามีค่ารีโอเบสประมาณ 2 มิลลิแอมป์ ค่า Utilization time ในกล้ามเนื้อปกติมีค่าประมาณ 10 มิลลิวินาที และค่าโครเนกซ์ (C) มีค่าประมาณ 0.1 - 1 มิลลิวินาที (Friedli WG and Meyer M, 1984 : 184-189)

เส้นโค้งเอส-ดีมี 2 ชนิด ได้แก่

1. เส้นโค้งเอส-ดีที่ได้จากกระแสไฟรูปร่างสี่เหลี่ยม แสดงในรูปที่ 8 โดยเส้นโค้ง A เส้นปกติ และ B ผิดปกติ กล้ามเนื้อที่ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยงอย่างสมบูรณ์ เส้นโค้งเอส-ดีจะเลื่อนไปด้านขวาและขึ้น

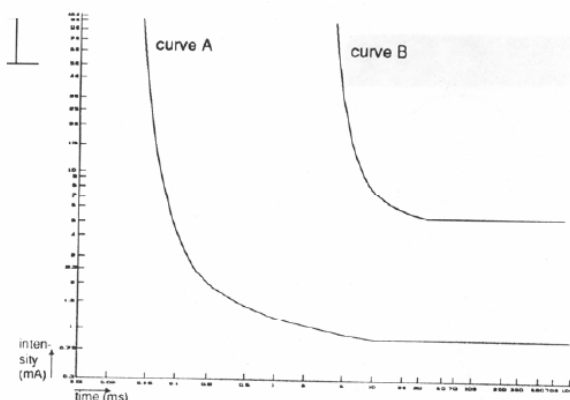
ด้านบน ซึ่งหมายถึงค่าโครเนกซ์และค่าช่วงเวลาที่พอเหมาะสูงขึ้น ทำให้ยากต่อการกระตุ้นให้กล้ามเนื้อหดตัว อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่กล้ามเนื้อขาดเส้นประสาทมาเลี้ยงบางส่วน หากกระตุ้นจะทำให้กล้ามเนื้อที่ยังมีเส้นประสาทมาเลี้ยงเท่านั้นเกิดการหดตัว หรือ

วารสารมหาวิทยาลัยคริสเตียน

ปีที่ ๑๘ ฉบับที่ ๑ (มกราคม - เมษายน) ๒๕๕๕

หากต้องการให้กล้ามเนื้อในส่วนที่ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยงหดตัว ต้องใช้ความเข้มของกระแสมากขึ้น ซึ่งอาจทำความบาดเจ็บให้ใยกล้ามเนื้อที่ยังคงมีเส้นประสาทมาเลี้ยงได้ เนื่องจากกล้ามเนื้อหดตัวแรงเกินไป ในทาง

ปฏิบัติ นักกายภาพบำบัดควรใช้ไฟรูปร่างสี่เหลี่ยมกระตุ้นด้วยขั้วลบที่ส่งจากแหล่งผลิตแบบกระแสไฟคงที่เพื่อให้ได้เส้นโค้งเอส-ดีที่นำเชื้อติดมากที่สุด (Geddes LA, 2007 : 176-181.)



รูปที่ 8 แสดงเส้นโค้งเอส-ดีที่ได้จากกระแสไฟสี่เหลี่ยม โดย A คือเส้นปกติ B คือเส้นที่ผิดปกติ

2. เส้นโค้งเอส-ดีที่ได้จากกระแสไฟรูปร่างสามเหลี่ยม หรือเรียกว่าโปรเกรสซีฟ เอ็กโปเนนเชียลพัลส์ (Progressive exponential pulse) กระแสไฟรูปร่างสามเหลี่ยมมีประโยชน์มากในกรณีที่ต้องการแยกรอยโรคระหว่างกล้ามเนื้อที่มีเส้นประสาทมาเลี้ยงและขาดเส้นประสาทมาเลี้ยง เส้นประสาทเป็นเนื้อเยื่อที่สามารถขึ้นต่อกระแสไฟกระตุ้นได้ ซึ่งการใช้ไฟรูปร่างสามเหลี่ยมกระตุ้น การเคยชินต่อกระแสจะขึ้นอยู่กับความชันของรูปร่างไฟรูปร่างสามเหลี่ยม หากความชันของกระแสไฟรูปร่างสามเหลี่ยมสูงกว่าใยประสาท

ดังรูปที่ 14 A ทำให้การเกิดความเคยชินต่อกระแสน้อยลง มีลักษณะการตอบสนองเช่นเดียวกับไฟรูปร่างสี่เหลี่ยม และหากไฟรูปร่างสามเหลี่ยมที่กระตุ้นต่ำกว่าเส้นใยประสาท ดังรูปที่ 9 B ความเคยชินของกระแสก็สามารถเกิดขึ้นได้ง่าย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มความเข้มของกระแสมากขึ้นเพื่อให้เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อ เมื่อเทียบกับไฟรูปร่างสี่เหลี่ยมแล้วไฟรูปร่างสามเหลี่ยมจะใช้เวลาของกระแสในการกระตุ้นให้เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อมากกว่า



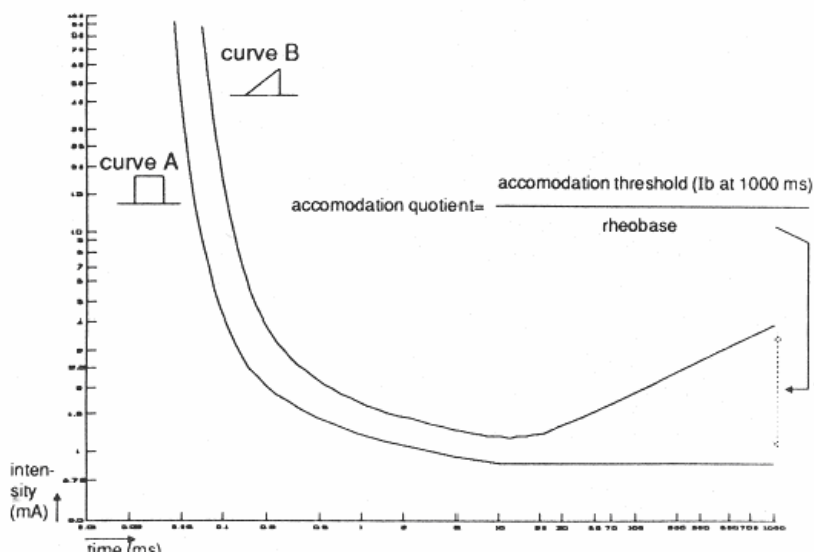
รูปที่ 9 แสดงรูปร่างของกระแสไฟรูปร่างสามเหลี่ยมที่ทำให้เกิดความเคยชินต่อการกระตุ้น

เส้นโค้งเอส-ดีที่ได้จากกระแสไฟรูปร่างสามเหลี่ยมในสภาวะกล้ามเนื้อปกติจะมีลักษณะดังรูปที่ 10 B หากช่วงกระตุ้นแคบและความชันของรูปร่างไฟรูปร่างสามเหลี่ยมสูง (รูป 9A) จะให้เส้นโค้งเอส-ดีที่คล้ายคลึงกับเส้นโค้งเอส-ดีที่ได้จากไฟรูปร่างสี่เหลี่ยม หากรูปร่างของกระแสไฟรูปร่างสามเหลี่ยมมีช่วงกระตุ้นยาวและมีความชันน้อย เส้นประสาทจะเกิดความเคยชินต่อกระแสกระตุ้นทำให้เส้นโค้งเอส-ดีสูงขึ้น อัตราส่วนระหว่างเส้นโค้งเอส-ดีจากไฟรูปร่างสี่เหลี่ยมต่อไฟรูปร่างสามเหลี่ยม เรียกว่า อัตราส่วนความเคยชิน (Accommodation quotient) ซึ่งมีสัดส่วนของความเข้มของกระแสสี่เหลี่ยมที่ 1,000 มิลลิวินาที (รีโอเบส) และความเข้มของกระแสไฟรูปร่างสามเหลี่ยมที่ 1,000 มิลลิวินาที หรือระดับที่ก่อให้เกิดความเคยชิน (Accommodation threshold)

ในกล้ามเนื้อปกติ ค่าอัตราส่วนความเคยชินอยู่ระหว่าง 2- 6 หากต่ำกว่านี้แสดงว่าอาจมีความเสื่อมของเส้นประสาท ซึ่งทำให้เส้นประสาทมีความไวลดลง (Hypo-sensitivity) หรือหากค่าอัตราส่วนความเคยชินสูงขึ้น อาจมีปัญหาน้ำเยื่อไขว้เกินปกติ

(Neurogenic dystonia) ช่วงกระตุ้นที่ทำให้กล้ามเนื้อหดตัวน้อยที่สุดโดยที่ใช้ความเข้มของกระแสไฟฟ้าที่สุด เรียกว่า ช่วงกระตุ้นที่เหมาะสม (Optimal phase time) ซึ่งในกล้ามเนื้อปกติมีค่าประมาณ 20 มิลลิวินาที

ความแตกต่างระหว่างเส้นประสาทและกล้ามเนื้อคือ กล้ามเนื้อไม่สามารถเกิดความเคยชินต่อการกระตุ้นด้วยกระแสไฟได้ จากรูปที่ 11 B มีรูปร่างคล้ายเส้นโค้งเอส-ดีที่ได้จากกระแสไฟรูปร่างสี่เหลี่ยม ความแตกต่างดังกล่าวทำให้ทราบถึงกล้ามเนื้อที่มีเส้นประสาทมาเลี้ยงหรือไม่มีเส้นประสาทมาเลี้ยง เส้นโค้งเอส-ดี ของกล้ามเนื้อที่ขนาดเส้นประสาทมาเลี้ยงบางส่วนจะมี 2 เส้นโค้ง ได้แก่ เส้นโค้งที่แสดงใยกล้ามเนื้อที่มีเส้นประสาทมาเลี้ยง ดังรูป 11 A และเส้นโค้งที่แสดงใยกล้ามเนื้อที่ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยง ดังรูป 11 B ในกล้ามเนื้อที่ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยงอย่างสมบูรณ์ จะไม่พบว่าเนื้อเยื่อเกิดความเคยชินต่อการกระตุ้นได้ ถ้าเส้นโค้งเอส-ดีจะเลื่อนไปทางซ้ายและต่ำลง แสดงว่าเริ่มมีเส้นประสาทมาเลี้ยงบางส่วนแล้ว หลังจากนั้นจะเริ่มสังเกตเห็นการฟื้นฟูทางคลินิกได้ในลำดับที่ 6 ถึง 8



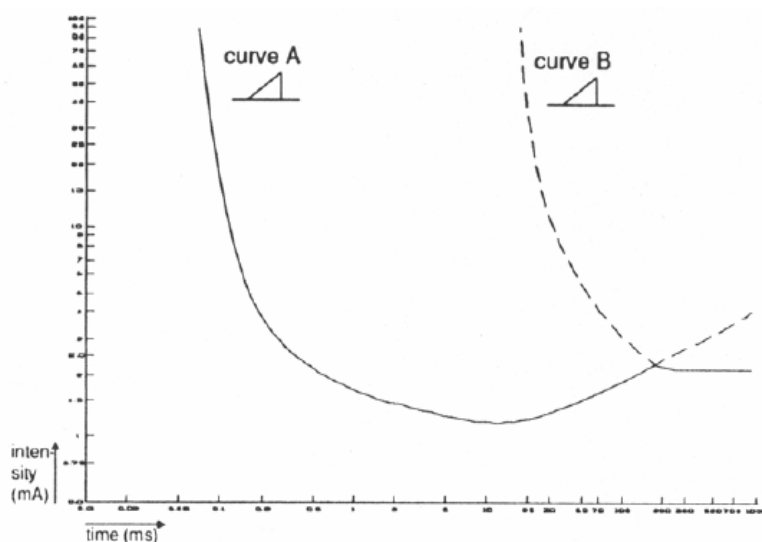
รูปที่ 10 แสดงเส้นโค้งเอส-ดีที่ได้จากกระแสไฟรูปร่างสี่เหลี่ยม (A) และสามเหลี่ยม (B)

วารสารมหาวิทยาลัยคริสเตียน

ปีที่ ๑๘ ฉบับที่ ๑ (มกราคม - เมษายน) ๒๕๕๕

รอยหยัก (Kink) รูปที่ 11 และรูปที่ 12 (เส้นกลาง) ในเส้นโค้งเอส-ดีที่ได้จากไฟรูปร่างสามเหลี่ยมเป็นตัวบ่งชี้ถึงภาวะขาดเส้นประสาทมาเลี้ยงบางส่วน (Partial denervation) ช่วงกระตุ้นที่แคบเท่านั้นที่สามารถกระตุ้นให้เห็นการหดตัวของกล้ามเนื้อที่มีเส้นประสาทมาเลี้ยงได้ หากใช้ช่วงกระตุ้นที่ยาวเส้นประสาทก็จะเกิดความเคยชินต่อการกระตุ้น และเส้นโค้งนี้จะมีจุดตัดกับเส้นโค้งเอส-ดีของไฟรูปร่าง

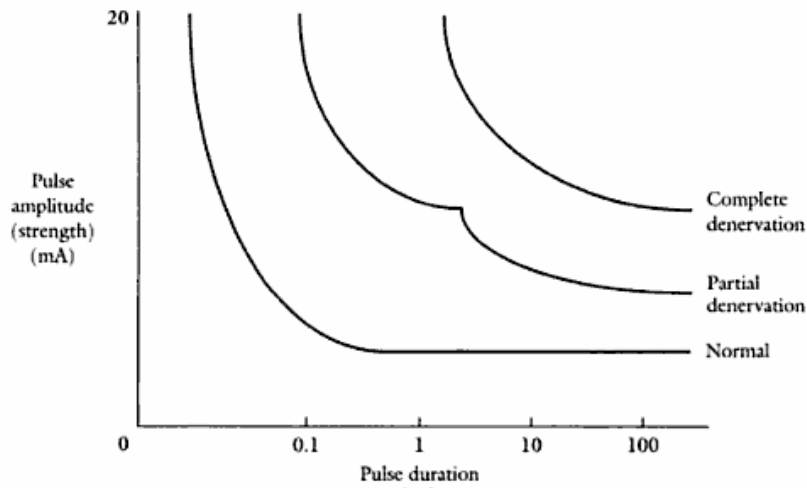
สามเหลี่ยมของกล้ามเนื้อที่ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยง หลังจากจุดตัดนี้จะพบการหดตัวของกล้ามเนื้อที่ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยงเท่านั้น ถ้าหากต้องการให้เฉพาะกล้ามเนื้อที่ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยงเกิดการหดตัวต้องใช้กระแสไฟรูปร่างสามเหลี่ยมที่มีช่วงกระตุ้นยาวกว่าช่วงกระตุ้นของกระแสไฟรูปร่างสามเหลี่ยม ณ ตำแหน่งจุดตัด



รูปที่ 11 แสดงเส้นโค้งเอส-ดีที่ได้จากไฟรูปร่างสามเหลี่ยมในกล้ามเนื้อที่ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยงบางส่วน

กระแสไฟรูปร่างสามเหลี่ยมจะให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับสถานะของกล้ามเนื้อที่ขาดเส้นประสาทและการตั้งค่าพารามิเตอร์มากกว่ากระแสไฟรูปร่างสี่เหลี่ยม กล้ามเนื้อที่ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยง

สามารถกระตุ้นด้วยไฟรูปร่างสามเหลี่ยม อย่างไรก็ตามทั้งไฟรูปร่างสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมสามารถเร่งขบวนการฟื้นฟูเส้นประสาทให้มาเลี้ยงกล้ามเนื้อได้



รูปที่ 12 แสดงเส้นโค้งเอส-ดี เส้นบนสุด คือกล้ามเนื้อที่ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยง (Complete denervation) เส้นกลาง คือกล้ามเนื้อที่ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยงบางส่วน (Partial denervation) และเส้นล่างสุด คือกล้ามเนื้อปกติ (Andrew J. Robinson and Lynn Snyder-Mackler, 2007 : 476-477)

สรุป

รูปร่างกระแสไฟ ขั้วกระตุ้น ความต้านทาน ของกระแส ความแตกต่างของเนื้อเยื่อ และอุณหภูมิ มีผลต่อความน่าเชื่อถือของค่าโคโรแนกซ์ ในทางปฏิบัติ นักกายภาพบำบัดควรใช้ไฟรูปร่างสี่เหลี่ยม

กระตุ้นด้วยขั้วลบที่ส่งจากแหล่งผลิตแบบกระแสไฟ คงที่ และต้องทดสอบกล้ามเนื้อหลายมัดที่เลี้ยงโดยเส้นประสาทนั้นๆ เพื่อให้ได้เส้นโค้งเอส-ดีที่น่าเชื่อถือมากที่สุด

บรรณานุกรม

- Andrew J. Robinson and Lynn Snyder-Mackler. (2007). *Clinical electrophysiology : electrotherapy and electrophysiologic testing*. 3rd edition. Philadelphia : Lippincott Williams & Wilkins.
- Caruso P. N., Pearce J. A., and DeWitt D. P. (1979). Temperature and current density distributions at electrosurgical dispersive electrode sites. *Proc. N. Eng. Bioeng. Conf.* 7(1) : 373-376.
- Friedli WG and Meyer M . (1984). Strength-duration curve: a measure for assessing sensory deficit in peripheral neuropathy. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 47(2) : 184-189.

- Gasser H. S. and Erlanger J. (1927). The role played by the sizes of the constituent fibers of a nerve trunk in determining the form of its action potential wave. *Amer. J. Physiol.*, 80(1):522-547.
- _____. (1922). A study of the action currents of nerve with the cathode ray oscilloscope. *Amer. J. Physiol.* 62(1) : 496-524.
- Geddes L. A. and Bourland J. D. (1985). The strength-duration curve. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 32(1) : 458-459.
- _____. (1985). Tissue stimulation : theoretical considerations and practical applications. *Med. Biol. Eng.* 23(2) : 131-137.
- Geddes L. A. (1999). Chronaxie. *Austral. Phys. Eng. Sci. Med. Biol.* 22(1).13-17.
- _____. (1997). Evolution of circuit models for the electrode-electrolyte interface. *Ann. Biomed Eng.* 25(1) : 1-14.
- _____. (2004). Accuracy limitations of Chronaxie value. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 51(1) : 176 - 181.
- Hill A. V. (1935). Excitation and accommodation in nerve. *Proc. Roy. Soc.* B119 : 305-354.
- Hodgkin A. L. (1939). The subthreshold potentials in a crustacean nerve fiber. *J. Physiol.* 126(1): 87-121.
- _____. (1951). The ionic basis of electrical activity in nerve and muscle. *Biol. Rev.* 26 : 339-409.
- Irnich W. (1980). The chronaxie time and its practical importance. *PACE.* 3(1) : 292-301.
- Lapicque L. (1907). Influence d'une variation locale de temperature su l'excitabilit? du nerf moteur. *Comptes Rendus Soc: de Biol.* 62(1) : 35-37.
- Lucas K. (1906). The analysis of complex excitable tissues by their response to electric currents of short duration. *J. Physiol.* 35(1) : 310-331.
- Overmeyer K. M., Pearce J. A., and DeWitt D. P. (1979). Measurement of temperature distribution at electrosurgical dispersive electrode sites. *J. Biomech. Eng.* 10(1) : 66-72.
- Ritchie A. and Smith C. R. (1944). The electrical diagnosis of peripheral nerve injury. *Brain.* 67(1). 314-330.
- Wessale J. L., Geddes L. A., Ayers G. M., and Foster K. S. (1992). Comparison of rectangular and exponential pulses for evoking sensation. *Ann. Biomed. Eng.* 20(1) : 237-244.