Chula Med J Vol. 49 No. 8 August 2005

การบาดเจ็บและการตายจากกระแสไฟฟ้า

กรเกียรติ วงศ์ไพศาลสิน*

Vongpaisarnsin K. Injuries and death from the electricity. Chula Med J 2005 Aug; 49(8): 467 - 74

Recently, not only use the history but the pathological findings also giving additional data for diagnosis the injury and define the cause of death from electricity. There are more significant findings that use to identify the injury from electricity. Few literatures discussed about these. This paper is reviewed the physic of the electricity related tissue injuries and explained the pathological findings that useful for diagnose, give an appropriate treatment and define the cause of death.

Keywords : *Electricity, Electrocution, Cause of death, Pathology.*

Reprint request: Vongpaisarnsin K. Department of Forensic Medicine, Faculty of Medicine, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.

Received for publication. May 3, 2005.

วัตถุประสงค์ :

1. เพื่อเป็นการทบทวนหลักการของกระแสไฟฟ้า และนำมาอธิบายถึงผลกระทบทางกายภาพที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า
2. เพื่อเพิ่มความเข้าใจในการวินิจฉัย และการบอกถึงพยาธิสภาพที่เกิดในอวัยวะต่าง ๆ
3. เพื่อเพิ่มความเข้าใจในผลของอวัยวะที่ได้รับบาดเจ็บ และเพื่อวางแนวทางในการรักษาผู้บาดเจ็บจากกระแสไฟฟ้าได้

*ภาควิชานิติเวชศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในปัจจุบัน แม้ว่าการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดจากกระแสไฟฟ้า และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าได้ปรับปรุงและพัฒนาให้มีความปลอดภัยสูงขึ้น แต่การตายและการบาดเจ็บจากกระแสไฟฟ้าในหลายประเทศก็ยังคงมีการรายงานอยู่เป็นระยะ (เช่น ในสหรัฐอเมริกา แต่ละปีมีอัตราการตายจากกระแสไฟฟ้าเนื่องจากอุบัติเหตุเท่ากับ 0.54 ต่อประชากร 100,000 คน คิดเป็นจำนวนประมาณ 1,000 คนต่อปี)[1] ในทางการแพทย์และนิติเวช มักพบผู้ป่วยหรือผู้เสียชีวิตจากกระแสไฟฟ้าอยู่เสมอ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากประวัติ การตรวจร่างกาย และข้อมูลการตรวจชันสูตรในสถานที่เกิดเหตุ เพื่อช่วยประกอบการวินิจฉัย การวางแผนการรักษา รวมถึงการบอกสาเหตุการตายได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งในประเทศไทย ตามหลักประมวลกฎหมายวิธีพิจารณาความอาญามาตรา 148 ได้กำหนดให้แพทย์ร่วมกับพนักงานสอบสวนออกตรวจชันสูตรพลิกศพในการตายผิดธรรมชาติ เพื่อหาสาเหตุและพฤติการณ์การตายที่แท้จริง จึงมีความจำเป็นที่แพทย์ต้องมีความรู้ในเรื่องของการตรวจบาดแผล พยาธิสภาพการบาดเจ็บ หลักการของกระแสไฟฟ้าซึ่งนำไปสู่การบอกถึงสาเหตุการตายและพฤติการณ์การตาย ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทความนี้

หลักการของกระแสไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้า คือ การเคลื่อนที่ของอิเลคตรอน ซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบ เคลื่อนที่ผ่านตัวนำไฟฟ้าเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า สามารถวัดค่าได้เป็นหน่วยแอมแปร์ (Amperes) กระแสไฟฟ้าจะเคลื่อนที่จากบริเวณค่าที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าจากศักย์ไฟฟ้าสูงไปต่ำมีหน่วยเป็นโวลต์ (Volts) และสารที่เป็นตัวนำทุกชนิดจะมีค่าความต้านทาน ซึ่งวัดออกมาได้ มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ohms)

กระแสไฟฟ้ามีอยู่ 2 ระบบ คือกระแสไฟฟ้าตรง (Direct current, DC) พบในอุปกรณ์แหล่งพลังงานต่าง ๆ เช่น แบตเตอรี่ เป็นต้น และกระแสไฟฟ้าสลับ (Alternative current, AC) จะเคลื่อนที่ออกจากระบบ ในรูปคลื่น (Sine wave) และอยู่ในแนวแกนที่ตั้งฉากกันทั้ง 3 แกน (Three Phases) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วตามอาคารบ้านพักต่าง ๆ จะใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ AC ในค่าความถี่มาตรฐาน 55 - 60 รอบต่อวินาที (Hertz)

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของแต่ละแหล่งพลังงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง High voltage source (มากกว่า 1,000 โวลต์) และแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์ต่ำ Low voltage source (น้อยกว่า 1,000 โวลต์) ซึ่งจากความสำเร็จในการพัฒนาตัวแปลงไฟฟ้า (Transformers) ทำให้อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ใช้กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำลง (220 โวลต์ในประเทศแถบเอเชีย และ 120/240 โวลต์ในสหรัฐอเมริกาและแคนาดา)

มีการศึกษาถึงการตอบสนอง การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาต่อกระแสไฟฟ้าในปริมาณต่าง ๆ กัน (ตารางที่ 1) โดยระดับกระแสไฟฟ้า 5-20 มิลลิแอมแปร์ จะเกิดอาการกระตุกของกล้ามเนื้อลาย หากเมื่อมีการสัมผัสอุปกรณ์ที่มีกระแสไฟฟ้ารั่ว ก็ยังสามารถดึงส่วนที่สัมผัสออกได้ ทำให้เกิดความรุนแรงและการบาดเจ็บไม่มาก แต่ถ้าได้รับกระแสไฟฟ้ามากกว่า 20 มิลลิแอมแปร์ จะทำให้เกิดการหดเกร็งของกล้ามเนื้อ ส่งผลให้ไม่สามารถดึงมือหรือส่วนที่สัมผัสออกจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าได้ การบาดเจ็บจะรุนแรงมากขึ้นจนอาจเสียชีวิตได้

ตารางที่ 1. การเปลี่ยนแปลงทางสรีระที่เกิดขึ้นในปริมาณกระแสไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ[1,2,8]

กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	การตอบสนองของร่างกาย
1	ความรู้สึกเหมือนถูกของแหลมทิ่ม
5-20	กล้ามเนื้อลายกระตุก
20-50	กล้ามเนื้อลายหดเกร็ง, หมดสติ
50-100	หัวใจเต้นผิดจังหวะ (ventricular fibrillation)
>2,000	กล้ามเนื้อหัวใจหดเกร็ง, หยุดหายใจ
15,000 - 30,000	ฟิวส์ตามบ้านเริ่มตัด

อย่างไรก็ดี อันตรายที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับ AC มีมากกว่าไฟฟ้ากระแสตรง DC (ประมาณ 3 เท่า เนื่องจากไฟฟ้ากระแสสลับ AC ทำให้เกิดการแข็งเกร็งของกล้ามเนื้อ (Tetanic muscle contraction) ส่งผลให้มีการสัมผัสกับกระแสไฟฟ้าเป็นเวลานานมากขึ้น[2] ส่วนอันตรายที่เกิดจากฟ้าผ่า จัดเป็นรูปแบบหนึ่งของไฟฟ้ากระแสตรง DC ซึ่งเกิดขึ้นจากความต่างศักย์ระหว่างพื้นดินและชั้นบรรยากาศ (ค่าความต่างศักย์เกินกว่า 1,000,000 โวลต์) [3] สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากถึง 200,000 แอมแปร์ และสามารถเปลี่ยนเป็นรูปของความร้อน หรืออุณหภูมิที่สูงขึ้นมากถึง 50,000 องศาฟาเรนไฮต์ (27,760 องศาเซลเซียส) แต่อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาที่สั้นและเร็วส่งผลให้วัตถุหรือบุคคลที่ถูกฟ้าผ่า ไม่เกิดการหลอมเหลวหรือลุกไหม้จากผลของความร้อนดังกล่าว[4,5] (ตารางที่ 2)

การบาดเจ็บจากกระแสไฟฟ้า

ผลของกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการบาดเจ็บในมนุษย์ มี 2 ลักษณะ คือ

1. ผลโดยตรงของกระแสไฟฟ้า Direct effect
2. ผลโดยอ้อมของกระแสไฟฟ้า Indirect effect

ผลโดยตรงของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการบาดเจ็บต่ออวัยวะหรือเนื้อเยื่อต่าง ๆ ที่กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่าน หรือเป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปเป็นความร้อนของกระแสไฟฟ้า แสดงให้เห็นการบาดเจ็บในรูปของการไหม้ในลักษณะรูปแบบต่าง ๆ ส่วนผลโดยอ้อมเป็นผลที่เกิดขึ้นตามมาจากการที่กล้ามเนื้อหดเกร็งตัวอย่างรุนแรง

โดยทั่วไปแล้วชนิดของการบาดเจ็บจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้า จากกฎความสัมพันธ์ของโอห์ม (Ohm's law) พบว่ากระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับความต่างศักย์ไฟฟ้า และแปรผกผันกับความต้านทานไฟฟ้า (กระแส

ตารางที่ 2. เปรียบเทียบการบาดเจ็บของฟ้าผ่า ไฟฟ้าศักย์สูง และไฟฟ้าศักย์ต่ำ [3]

	ฟ้าผ่า	ไฟฟ้าศักย์สูง	ไฟฟ้าศักย์ต่ำ
ความต่างศักย์	>30 x10^6	>1,000	<600
กระแสไฟฟ้า	>200,000	<1,000	<240
ระยะเวลา	ระยะเวลาทันที	ระยะเวลาชั่วขณะ	ระยะเวลานาน
ชนิดของกระแสไฟฟ้า	ไฟฟ้ากระแสตรง	ไฟฟ้ากระแสตรง/สลับ	ไฟฟ้ากระแสสลับ
สาเหตุการตายจากหัวใจ	หัวใจหยุดเต้น	หัวใจเต้นผิดจังหวะ	หัวใจเต้นผิดจังหวะ
สาเหตุการตายจากระบบหายใจ	การบาดเจ็บต่อระบบประสาทส่วนกลาง	การเกร็งกระตุกของกล้ามเนื้อที่ใช้ในการหายใจ	การเกร็งกระตุกของกล้ามเนื้อที่ใช้ในการหายใจ
การแข็งตัวของกล้ามเนื้อ	เกร็งไม่กระตุก	เกร็งไม่กระตุกในไฟฟ้ากระแสตรง และเกร็งกระตุกในไฟฟ้ากระแสสลับ	เกร็งกระตุกของกล้ามเนื้อที่ใช้ในการหายใจ
การไหม้ของผิวหนัง	ไม่ค่อยพบ	พบได้ในผิวหนังชั้นลึก	มักพบในผิวหนังชั้นตื้น
ภาวะ Rhabdomyolysis	ไม่ค่อยพบ	พบได้บ่อย ๆ	พบได้
สาเหตุของการบาดเจ็บ	Blast, Shock wave	กล้ามเนื้อกระตุก/ล้ม	ไม่ค่อยพบ

ไฟฟ้า = ความต่างศักย์ไฟฟ้า / ความต้านทานไฟฟ้า) จากความสัมพันธ์ดังกล่าว พบว่าการบาดเจ็บจากกระแสไฟฟ้าจะมาก หรือน้อยนั้น จึงขึ้นอยู่กับทั้งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และค่าความต้านทานไฟฟ้า

ความต้านทานไฟฟ้า Resistance จึงมีบทบาทต่อความรุนแรงของการบาดเจ็บ และพยาธิสภาพที่พบ โดยทั่วไปแล้ว เนื้อเยื่อแต่ละชนิดในร่างกาย จะมีค่าความต้านทานที่แตกต่างกันออกไป เช่น เส้นประสาท เลือด หลอดเลือด ชั้นเยื่อเมืองต่าง ๆ และกล้ามเนื้อทั้งหมดนี้ จะมีค่าความต้านทานอยู่ค่อนข้างน้อย เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานที่สูง เช่นในกระดูก ไขมัน และเส้นเอ็น แต่อย่างไรก็ดี ผิวหนังจัดเป็นด่านแรกในการสัมผัสของกระแสไฟฟ้า ซึ่งค่าความต้านทานจะแตกต่างกันออกไปตามแต่บริเวณของร่างกาย[2] ในผู้ใหญ่ มีค่าความต้านทานของผิวหนัง ตั้งแต่ 40,000 ถึง 100,000 โอห์ม ขึ้นอยู่กับความหนาของผิวหนังในแต่ละตำแหน่ง ผิวหนังที่เปียกชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ค่าความต้านทานลดลง ในบางกรณีความต้านทานของผิวหนังที่เปียกชื้นอาจลดลงเหลือเพียง 1,000 โอห์ม หรือต่ำกว่า[2,6]

ระยะเวลาที่สัมผัสเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อการบาดเจ็บดังที่กล่าวในข้างต้น ในปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เท่ากัน ถ้าได้รับกระแสไฟฟ้าเป็นเวลานาน หรือในช่วงที่หัวใจมี repolarization (ช่วง T wave ของ EKG) ก็จะเกิด ventricular fibrillation ได้ง่าย

ชนิดของกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสลับทำให้เกิดการบาดเจ็บและอันตรายได้มากกว่าไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากไฟฟ้ากระแสสลับทำให้เกิดการแข็งเกร็งกระตุกของกล้ามเนื้ออย่างต่อเนื่อง "Locking-on phenomenon" ทำให้เกิดการสัมผัสกับ กระแสไฟฟ้าเป็นเวลานานขึ้น ในทางตรงกันข้ามกับไฟฟ้ากระแสตรง จะทำให้เกิดการกระตุกของกล้ามเนื้อหนึ่งครั้ง ส่งผลให้เกิดแรงผลักบุคคลหรือวัตถุที่สัมผัส ออกจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการบาดเจ็บที่น้อยกว่า [2] แต่ความแตกต่างดังกล่าวเกิดในกรณีที่ กระแสไฟฟ้าเป็นชนิดกระแสไฟฟ้าศักย์ต่ำเท่านั้น ในขณะที่ไฟฟ้าศักย์สูงจะให้ผลของการบาดเจ็บใกล้เคียงกันทั้งในไฟฟ้ากระแสตรงและสลับ

เส้นทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า เริ่มต้นจากทางเข้าไปจนถึงทางออกของกระแสไฟฟ้า มีความสำคัญทั้งในการประเมินการบาดเจ็บเพื่อการรักษา บอกถึงการพยากรณ์ของการบาดเจ็บด้วย และช่วยในการอธิบายถึงสาเหตุการตายได้ เส้นทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าในแนวดิ่งขนานกับแนวกลางลำตัว เป็นรูปแบบที่อันตรายมากที่สุด เนื่องจากกระแสไฟฟ้าผ่านอวัยวะภายในที่สำคัญหลายอวัยวะ เช่น ระบบประสาทส่วนกลาง สมอง หัวใจ กล้ามเนื้อที่ใช้ในการหายใจ ส่วนการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าในลักษณะจากข้างหนึ่งของลำตัว ไปยังอีกข้างหนึ่ง เช่น จากมือซ้ายไปมือขวา กระแสไฟฟ้าจะไม่ผ่านระบบประสาทส่วนกลาง และสมอง แต่ก็มีอันตรายที่ทำให้ตายได้ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าผ่านหัวใจ [7]

ในขณะที่การเกิดการบาดเจ็บของกระแสไฟฟ้าศักย์ต่ำ Low-voltage เกิดได้จากการที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของร่างกายสัมผัสกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า แต่ในกลับกัน กระแสไฟฟ้าศักย์สูง High-voltage กระแสไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านจากแหล่งกำเนิดมายังร่างกาย ในลักษณะของการเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนในอากาศเป็นแนวโค้ง (Arcs) ก่อนที่จะมีการสัมผัส การเคลื่อนที่ในลักษณะดังกล่าวนี้สามารถทำให้เกิดความร้อนได้สูงถึง 5,000 องศาเซลเซียส (9,032 องศาฟาเรนไฮต์) ทำให้เกิดการบาดเจ็บจากความร้อนที่รุนแรงได้

ส่วนรูปแบบการเกิดการบาดเจ็บจากฟ้าผ่า สามารถอธิบายได้ใน 4 ลักษณะ [2,4,8] คือ

1. Direct strike การบาดเจ็บที่เกิดจากการที่ผู้บาดเจ็บโดนฟ้าผ่าโดยตรง

2. Side flash การบาดเจ็บที่เกิดจากฟ้าผ่าไปยังวัสดุหรือสิ่งมีชีวิตที่อยู่ใกล้ ๆ กับ ผู้บาดเจ็บ และสามารถเกิดกระแสฟ้ามาถึงยังบุคคลที่อยู่ใกล้เคียงได้

3. Stride potential การบาดเจ็บที่เกิดจากการที่ฟ้าผ่าลงพื้นดิน แล้วส่งกระแสไฟเข้าสู่ผู้บาดเจ็บจากเท้า

ข้างหนึ่ง และออกที่เท้าอีกข้างหนึ่ง

4. Flash over phenomenon การบาดเจ็บที่เกิดจากพลังงานที่เกิดอยู่ภายนอกร่างกาย จากการที่ความร้อนของกระแสไฟฟ้าทำให้น้ำที่ผิวหนังกลายเป็นไอน้ำ และเกิดแรงระเบิดระหว่างเสื้อผ้าหรือรองเท้าที่สวมใส่อยู่

พยาธิสภาพและสาเหตุการตายจากกระแสไฟฟ้า

หัวใจและระบบการไหลเวียนโลหิต

การบาดเจ็บที่เกิดขึ้นกับหัวใจ เกิดได้ 2 ลักษณะ ดังนี้

1. กล้ามเนื้อหัวใจตาย Coagulative necrosis of myocardium

2. การเต้นของหัวใจผิดจังหวะ Cardiac arrhythmias

ความรุนแรงของการบาดเจ็บขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า ชนิดของกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาที่สัมผัส การบาดเจ็บพบได้ทั้งที่เป็นบริเวณเฉพาะ หรือกระจายทั่ว ๆ ไป มีการตายของกล้ามเนื้อหัวใจ Coagulative necrosis และตรวจพบ Contraction band necrosis เป็นหย่อม ๆ (Bark-like appearance) ของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ (รูปที่ 1)

รูปที่ 1. การตายของกล้ามเนื้อหัวใจ Coagulative necrosis และตรวจพบ Contraction band necrosis

การรบกวนจังหวะการเต้นของหัวใจมักเกิดกับการสัมผัสกับกระแสไฟฟ้าศักย์ต่ำ และมีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มากเกินกว่า 50 -100 มิลลิแอมแปร์ สามารถทำให้เกิด การเต้นผิดจังหวะของหัวใจชนิด Ventricular fibrillation ได้ ส่วนการสัมผัสกับกระแสไฟฟ้าศักย์สูง ไม่ว่ากระแสตรงหรือกระแสสลับจะส่งผลให้หัวใจหยุดเต้น Cardiac standstills [9-12]

นอกจากนี้แล้วหลอดเลือดต่าง ๆ ก็ได้รับผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งเกิดจากการที่หลอดเลือดเป็นเนื้อเยื่อที่นำไฟฟ้าได้ดี และองค์ประกอบภายในเป็นส่วนประกอบของน้ำ ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเช่นกันหลอดเลือดแดงขนาดใหญ่ไม่ค่อยได้รับผลกระทบต่อความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้า เนื่องจากเลือดและองค์ประกอบภายใน ไหลและเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ดี หลอดเลือดดังกล่าวมีความไวต่อการเกิดการตายชนิด Medial necrosis, การเกิด Aneurysm และการแตกของ Aneurysm ส่วนในหลอดเลือดขนาดเล็กมักพบการตายชนิด Coagulation necrosis และมักพบในกรณีที่เกิดกับไฟฟ้าศักย์สูง (แต่ไม่พบในฟ้าผ่า) การบาดเจ็บของหลอดเลือดในบริเวณปลายมือปลายเท้า มักทำให้เกิด Compartment syndrome [2,13] ทั้งนี้โดยทั่วไปแล้วกระแสไฟฟ้าจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเซลล์เนื้อเยื่อ (Depolarization of cells) และความร้อน (Heat production) ความร้อนที่สูงขึ้นอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียสจะทำให้องค์ประกอบที่เป็นโปรตีนตกตะกอน [14] เกิดการแตกสลายของเม็ดเลือดแดง การตายของเม็ดเลือดขาว เกิดการกระตุ้นกลไกการเกาะกลุ่มของเกล็ดเลือดและเซลล์ที่เป็นส่วนประกอบของหลอดเลือดเกิดการตาย ซึ่งผลที่ตามมาในกรณีที่ผู้ประสบเหตุไม่ตายในทันที มักจะมีปัญหาในเรื่องของผลข้างเคียงเกิดการอุดตันของหลอดเลือด (Arterial and Venous thrombosis) ได้

ทั้งนี้ พยาธิสภาพที่พบได้ทั้งหมด มิได้เป็นตัวที่ใช้ในการวินิจฉัยการตายที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว เนื่องจากสามารถพบพยาธิสภาพ ดังกล่าวได้จากการตายในรูปแบบอื่น ๆ

ผิวหนัง

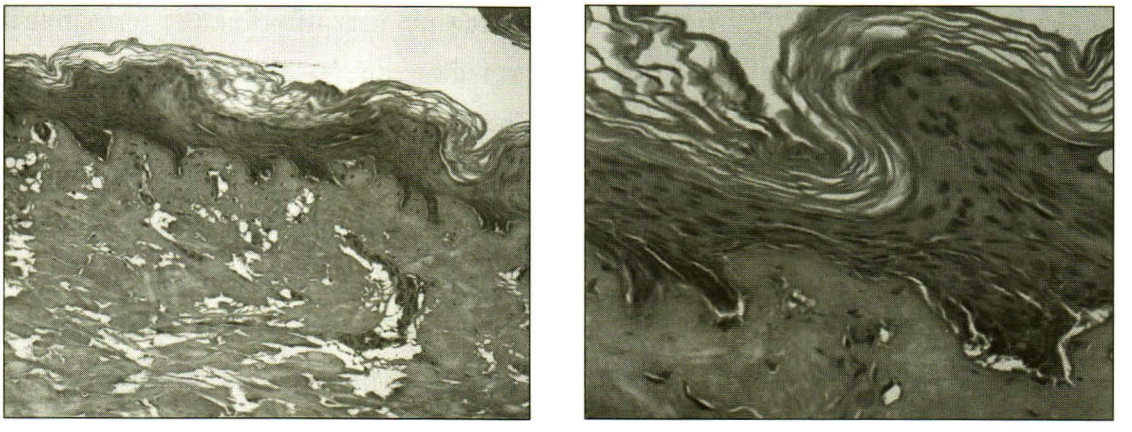
ความรุนแรงของบาดแผลขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้า, บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัส ความต้านทานของผิวสัมผัสและระยะเวลาในการสัมผัส (Heat *(joule)* = Current^2 x Resistance/4.187) ดังนั้นจึงอาจพบได้ตั้งแต่ เป็นเพียงการบวมแดงเฉพาะที่เพียงเล็กน้อย Local erythema จนถึง การไหม้ของผิวหนังอย่างรุนแรง (Full-thickness burns) การไหม้ของผิวหนังในระดับแรก (First-degree electrical burns) มักเกิดจากการสัมผัสกับกระแสไฟฟ้าต่อพื้นผิวสัมผัสปริมาณ มากกว่า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางมิลลิเมตร เป็นเวลาอย่างน้อย 20 วินาที ในขณะที่การไหม้ของผิวหนังในระดับที่สองและสาม ต้องมีการสัมผัสอย่างน้อย 75 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเต้นผิดจังหวะของกล้ามเนื้อหัวใจ[6,8,15] (ตารางที่ 1)

เนื่องจากความต้านทานของผิวหนังส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความชื้นของผิวหนัง กระแสไฟฟ้าโดยมากมักจะถูกส่งผ่านลงไปสู่เนื้อเยื่อชั้นลึกและอวัยวะภายในก่อนที่จะพบพยาธิสภาพของผิวหนัง ซึ่งเราสามารถพบพยาธิสภาพของผิวหนังในชั้นลึก เช่นการตายของเนื้อเยื่อและกล้ามเนื้อชั้นลึก (Massive coagulation and necrosis) ดังนั้นการประเมินถึงความรุนแรงที่เกิดขึ้น ไม่สามารถประเมินได้จากบาดแผลภายนอกเพียงอย่างเดียว [7, 15-17]

บาดแผลไหม้ที่มีความรุนแรงมาก มักเกิดจากกระแสไฟฟ้าศักย์สูง ซึ่งทำให้เกิด arc (เส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนในอากาศ) การบาดเจ็บไม่เพียงแต่เกิดจากผลของความร้อนหรืออุณหภูมิ (Flash burn) เท่านั้น แต่จะทำให้เกิดการไหม้ได้ทั้งจากผลของกระแสอิเลคตรอนผ่านร่างกาย (Electro-thermal burn) และผลจากการไหม้ของเสื้อผ้าที่สัมผัสกับผิวหนัง (Flame burn) อีกด้วย ส่วนลักษณะของการบาดเจ็บของผิวหนังที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าศักย์สูงจากฟ้าผ่า จะพบลักษณะพิเศษที่สามารถใช้ในการวินิจฉัยได้ คือ บาดแผลจะมีลักษณะเป็นรูปแบบคล้ายใบเฟิร์น (Lichtenburg figures, Ferns or Keraunographic markings)[18]

การวิจัยบางฉบับได้พูดถึงการตรวจหาบาดแผลภายในช่องปากโดยเฉพาะในเด็ก พบได้บ่อยในเด็กที่มีการเคี้ยวหรือเอาสายไฟฟ้าเข้าปาก ซึ่งอาจพบบาดแผลไหม้บริเวณริมฝีปาก ภายในผนังเยื่อบุช่องปาก และอาจลึกถึงเส้นประสาท หรือหลอดเลือดได้ [2, 19]

เมื่อกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ร่างกาย บริเวณผิวหนังที่สัมผัสกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะวิ่งผ่านตัวนำไฟฟ้าที่ดี เช่น เลือดภายในหลอดเลือด สารน้ำต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของเนื้อเยื่อและเซลล์ เกิดการแยกชั้นของผิวหนังชั้นนอก (Epidermis) บริเวณรอยต่อ Epidermal-dermal junction ซึ่งทำให้เกิดการบวมนูนขึ้นของผิวหนัง



รูปที่ 2-3. แสดงพยาธิสภาพของผิวหนังบริเวณที่สัมผัสกับกระแสไฟฟ้า

และมีรูปร่างกลม ประกอบด้วย ชั้นในสุดจะเป็นการตายไหม้เกรียมของผิวหนัง (Skin necrosis) ในชั้นถัดออกมาจะมีสีที่ค่อนข้างซีด ขอบผิวหนังยกนูนหนาขึ้น (Pale areola, Collapsed blister with raised edge) ส่วนชั้นนอกสุดจะมีสีค่อนข้างแดง (Hyperemic border) ส่วนบาดแผลที่ผิวหนังที่พบอีกลักษณะหนึ่ง เกิดจากการที่กระแสไฟฟ้าที่มีศักย์สูง และมีการเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนในอากาศ ทำให้เกิดบาดแผลที่มีลักษณะที่เรียกว่า (Arc or Spark burn) มีรูปร่างกลม ขอบไม่นูน และมีสีซีด พยาธิสภาพที่พบในตำแหน่งดังกล่าวจะมีลักษณะ ดังนี้ (รูปที่ 2-3)

1. นิวเคลียสภายในเซลล์ผิวหนังชั้นนอกจะมีลักษณะเรียงยาวขึ้นและเรียงตัวเป็นแนวในทิศทางเดียวกัน ซึ่งเป็นลักษณะจำเพาะที่เรียกว่า Streaming of nuclei ซึ่งเชื่อว่าเป็นผลที่เกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-magnetic effect) ทั้งนี้ไม่เฉพาะแต่เพียงการบาดเจ็บที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า พยาธิสภาพดังกล่าวอาจพบได้ในการบาดเจ็บที่เกิดจากความร้อนหรือการไหม้ของผิวหนัง [20]

2. Vacuolation เกิดจากการที่องค์ประกอบของของเหลวภายในผิวหนัง และเนื้อเยื่อรอบ ๆ เกิดความร้อนมากขึ้น ทำให้เกิดช่องอากาศทั้งที่ผิวหนังชั้นนอกเนื้อเยื่อบริเวณผิวหนังชั้นใน และทำให้เกิดการแยกชั้นของเซลล์ผิวหนังชั้นนอก

3. เมื่อย้อมสไลด์ด้วยเทคนิค H&E จะพบว่าบริเวณดังกล่าวจะติดสีชมพูแดงมากขึ้นกว่าปกติ

นอกจากนี้ ยังมีวิธีการตรวจชิ้นเนื้อย้อมพิเศษเพื่อตรวจหาโลหะหนักที่ฝังอยู่ใต้ผิวหนังบริเวณที่สัมผัสกับสายไฟฟ้าโลหะเช่น เงินหรือทองแดง และวิธีการแยกบาดแผลที่สาเหตุเกิดจากการบาดเจ็บจากกระแสไฟฟ้าหรือเกิดจากความร้อน โดยใช้ Scanning electron microscopy เป็นต้น

ระบบประสาท

ผลกระทบเกิดขึ้นทั้งกับระบบประสาทส่วนกลางและระบบประสาทส่วนปลาย แต่ผลทางการดูพยาธิสภาพจะไม่พบอะไรที่จะเป็นพยาธิสภาพหลักที่สำคัญ แต่อย่างไรก็ดีผลกระทบจากกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดการบาดเจ็บที่รุนแรงจนเสียชีวิตได้ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าจะไปกดการทำงานของระบบประสาทส่วนควบคุมการหายใจ (Respiratory center) ทำให้เสียชีวิตได้ [2, 7]

ระบบทางเดินหายใจ

ถึงแม้ว่าการตายจากสาเหตุ ระบบหายใจล้มเหลวเป็นภาวะที่พบได้บ่อยในการตายจากกระแสไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ดีไม่มีผลพยาธิสภาพที่ชี้เฉพาะใด ๆ ที่ใช้ช่วยในการวินิจฉัย และนอกจากปอดแล้วการตรวจหาบาดแผลควรตรวจดูบริเวณกล่องเสียงและทางเดินหายใจ ซึ่งอาจพบพยาธิสภาพที่เกิดจากความร้อนที่มาจากควัน หรือละอองจากความร้อน โดยเฉพาะกรณีไฟไหม้ ซึ่งทำให้เกิดการหลุดลอกของเยื่อบุผิวชั้นนอกของหลอดลมได้ [3]

อวัยวะในระบบอื่น ๆ

เนื่องจากไต เป็นอวัยวะที่ไวต่อการขาดเลือด การตรวจดูพยาธิสภาพที่ไต อาจพบว่ามีภาวะไตวายเฉียบพลันเกิดขึ้นได้ (Acute renal tubular necrosis) เป็นผลจากการที่กล้ามเนื้อตายและ ทำให้ระดับของ Myoglobin และ Creatinine Phosphokinase ในเลือดสูงขึ้น [2, 7]

การตรวจหูและตา ในกรณีที่สงสัยเกิดการบาดเจ็บจากฟ้าผ่า จะต้องทำการตรวจ ภายในช่องรูหูเพื่อตรวจดูว่าเยื่อบุแก้วหูมีการฉีกขาด (Ruptured of tympanic membranes and sensory-neural hearing loss) หรือเลือดออกภายในหูชั้นในหรือไม่ และตรวจดูพยาธิสภาพที่ตา เนื่องจากการบาดเจ็บจากฟ้าผ่าจะทำให้เกิดผลข้างเคียงที่ตามมาสามารถเกิดต้อกระจกได้ (Cataracts) [2, 5, 7]

การตรวจกระดูก โดยผลทางตรงจากกระแสไฟฟ้าทำให้กล้ามเนื้อลายเกิดการหดตัวอย่างรุนแรง แล้วผลทางอ้อมจากการที่ผู้ที่ถูกไฟฟ้าดูด ตกลงมาจากที่สูง ซึ่งส่งผลทำให้กระดูกหักได้โดยที่อาจไม่พบพยาธิสภาพภายนอกใด ๆ โดยตำแหน่งที่มักพบว่ามีการหักได้มากคือ กระดูกแขน และกระดูกสันหลัง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการบาดเจ็บของไขสันหลังตามมา [3]