การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของการแทงไมโครนีดเดิลพอลิเมอร์เข้าสู่ผิวหนัง

*Noppamas Yolai, Wenting Shu, Eoin D. O'cearbhaill, **Charin Modchang**, and Aisling Ní Annaidh*

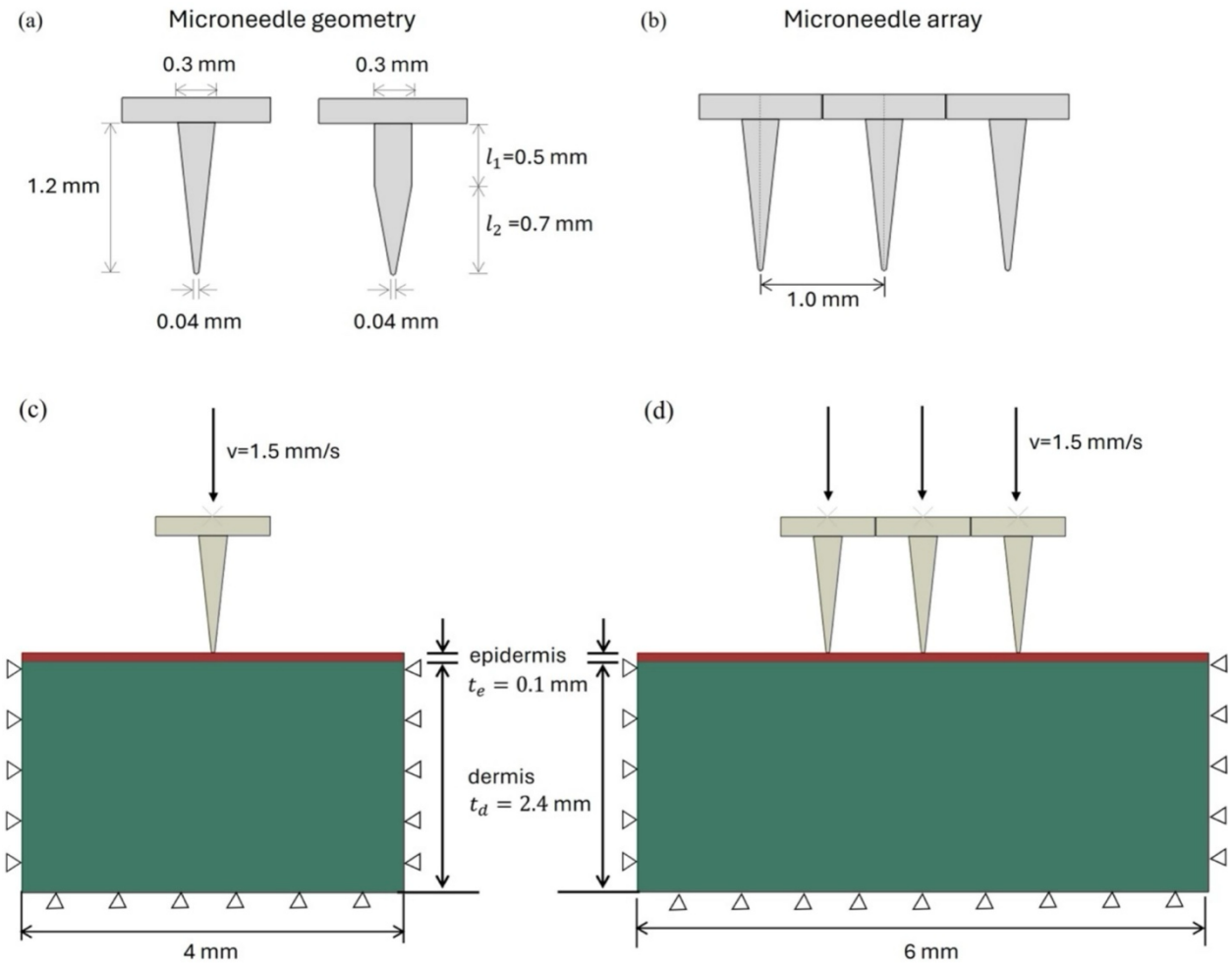
หลักการและเป้าหมาย: ไมโครนีดเดิลคือเข็มขนาดจิ๋ว (เล็กกว่า 1 มิลลิเมตร) ที่สามารถนำส่งยาและวัคซีนผ่านผิวหนังได้โดยไม่เจ็บปวด แม้ว่าไมโครนีดเดิลที่ทำจากพอลิเมอร์จะน่าสนใจเพราะราคาถูกและสามารถละลายเพื่อปล่อยยาได้ แต่ก็ประสบปัญหาสำคัญคือไม่แข็งแรงเท่าเข็มโลหะ อาจหักหรืองอเมื่อกดเข้าไปในผิวหนัง แบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่ผ่านมามองไมโครนีดเดิลเหมือนวัตถุโลหะแข็ง ซึ่งไม่สะท้อนการเปลี่ยนรูปของไมโครนีดเดิลพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจริง งานวิจัยนี้มุ่งสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่สมจริงมากขึ้นเพื่อเข้าใจพฤติกรรมของไมโครนีดเดิลพอลิเมอร์ขณะแทงเข้าผิวหนัง โดยเฉพาะภายใต้สภาวะการใช้งานจริง เช่น เมื่อแผ่นเข็มถูกติดในมุมเอียงหรือบนส่วนของร่างกายที่โค้ง

สรุป: นักวิจัยพัฒนาแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่ละเอียดเพื่อจำลองไมโครนีดเดิลพอลิสไตรีนที่กำลังแทงเข้าไปในแบบจำลองผิวหนังเทียมแบบสองชั้น พวกเขาทดสอบสถานการณ์ต่าง ๆ รวมถึงผลที่เกิดขึ้นเมื่อเข็มแทงในมุมต่าง ๆ ความโค้งของผิวหนังส่งผลต่อการแทงอย่างไร และการออกแบบเข็มแบบต่าง ๆ ทำงานอย่างไร (รูปร่าง ขนาด และระยะห่างระหว่างเข็มที่แตกต่างกัน) นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบวัสดุพอลิเมอร์ 4 ชนิดที่นิยมใช้ทำไมโครนีดเดิล แบบจำลองนี้มองไมโครนีดเดิลเป็นวัสดุที่ยืดหยุ่นได้ สามารถงอและเปลี่ยนรูปได้ แทนที่จะเป็นวัตถุแข็ง ทำให้นักวิจัยเห็นจุดที่ความเครียดสะสมและคาดการณ์จุดที่อาจเกิดความเสียหายได้

ผลที่ได้: การศึกษาเผยข้อค้นพบสำคัญหลายประการสำหรับการออกแบบไมโครนีดเดิล แม้แต่การเอียงเพียง 5 องศาระหว่างการใช้งานก็ทำให้เข็มรับแรงเกินจุดหักได้ แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นของอุปกรณ์ช่วยติดที่แม่นยำ พื้นผิวหนังที่โค้ง (เช่นบนแขน) สร้างแรงที่ไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะทำให้เข็มด้านนอกของแถวเครียดมาก ความแหลมของปลายเข็มส่งผลอย่างมากต่อแรงที่ต้องใช้ในการแทง สำคัญคือวัสดุพอลิเมอร์ไม่ใช่ทุกชนิดจะแข็งแรงพอ ในขณะที่พอลิสไตรีน พอลิคาร์บอเนต และกรดพอลิแลคติกแทงทะลุแบบจำลองผิวหนังได้สำเร็จ กรดไฮยาลูโรนิกกลับล้มเหลว งานวิจัยให้คำแนะนำการออกแบบที่เฉพาะเจาะจง เช่น รักษาระยะห่างระหว่างเข็มอย่างน้อย 1 มิลลิเมตร และใช้อัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง 3:1 เพื่อความแข็งแรงที่เหมาะสมโดยไม่เสียความสามารถในการแทงทะลุ

ทุนวิจัยและกิตติกรรมประกาศ: The Development and Promotion of Science and Technology Talents Project (DPST).

เป้าหมาย SDGs ที่เกี่ยวข้อง: 3. การมีสุขภาพและความเป็นอยู่ที่ดี



สรุปภาพ: รูปทรงของไมโครนีดเดิล นิยามแบบจำลอง และเงื่อนไขขอบเขต **(a)** ไมโครนีดเดิลเดี่ยว; รูปทรงกรวยและรูปทรงกรวยเรียว และ **(b)** แถวไมโครนีดเดิล 3 เข็ม **(c)** แบบจำลองการแทงไมโครนีดเดิลเดี่ยว ณ เวลาเริ่มต้น และ **(d)** แบบจำลองการแทงแถวไมโครนีดเดิล 3 เข็ม ณ ระยะเริ่มต้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง:

Yolai N, Shu W, O'cearbhaill ED, **Modchang C**, and Annaidh AN. Finite element analysis of polymeric microneedle insertion into skin. *Materials & Design*. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114936