

Thesis Title	Stress-Strain Relationship of Abdominal Aortic Wall	
Author	Miss Asawinee Danpinid	
Degree	Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)	
Thesis Advisory Committee		
	Prof. Dr. Pradit Terdtoon	Advisor
	Asst. Prof. Dr. Patrapon Kamonpet	Co-advisor
	Asst. Prof. Dr. Yottana Kunatorn	Co-advisor
	Asst. Prof. Dr. Sansanee Auephanwiriyaikul	Co-advisor

ABSTRACT

Arterial stiffness has been shown to be a good indicator of arterial wall disease. However, a single parameter is insufficient to describe the complex stress-strain relationship of a multi-component, non-linear tissue such as the aorta. We, therefore, propose a new approach to measure the stress-strain relationship locally *in vivo* and present a noninvasively, clinically relevant parameters describing the mechanical interaction between aortic wall constituents.

The slope change of the circumferential stress-strain curve was hypothesized as a contribution of elastin and collagen, which was noninvasively defined in the term of strain using only radial aortic wall acceleration, i.e., transition strain (ε_{θ}^T). Two-spring parallel was generically employed as the phenomenological model and three Young's moduli were accordingly evaluated, i.e., corresponding to the: elastic lamellae (E_1), elastin-collagen fibers (E_2) and collagen fibers (E_3). Our study performed on normal and Angiotensin II (AngII)-treated mouse abdominal aortas

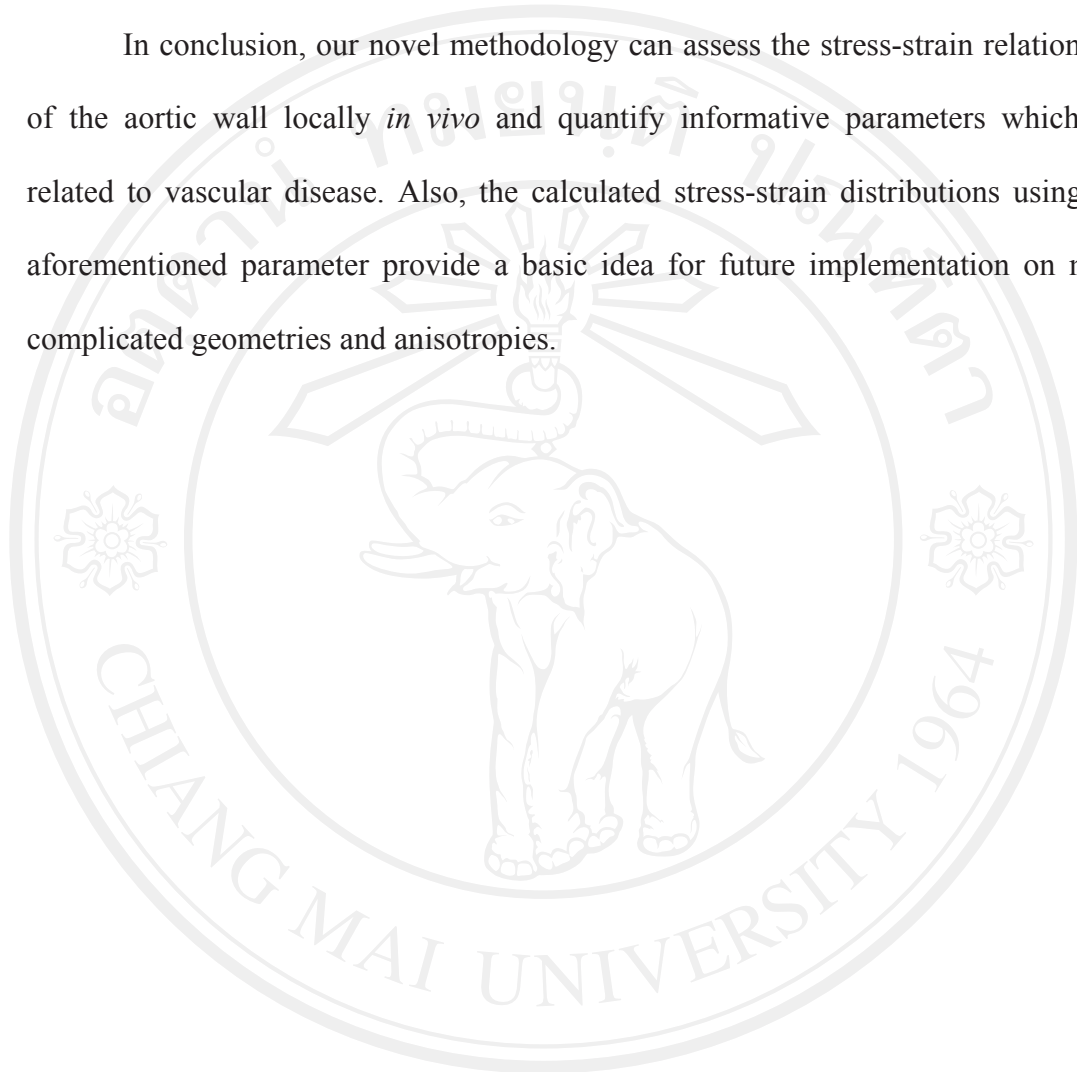
using aortic pressure from catheterization and local aortic wall diameters obtained using a cross-correlation technique on the radio frequency (RF) ultrasound signals at 30 MHz and frame rate of 8 kHz. Using our technique, transition strain and three Young's moduli in both normal and pathological aortas were mapped in two dimensional plane.

The slope change of the circumferential stress-strain curve was first observed *in vivo* under physiologic conditions. The transition strain was identified at the lower strain level in the AngII-treated case, i.e., 0.029 ± 0.006 of normal and 0.012 ± 0.004 of AngII-treated aortas. E_1 , E_2 and E_3 were 69.7 ± 18.6 , 214.5 ± 65.8 and 144.8 ± 55.2 kPa for normal aortas, respectively, and 222.1 ± 114.8 , 775.0 ± 586.4 and 552.9 ± 519.1 kPa for AngII-treated aortas, respectively. This is because of the alteration of structures and content of the wall constituents, the degradation of elastic lamella and collagen formation due to AngII treatment. In our case, the proposed Young's moduli presented only non-viscous, isotropic, elastic properties of the aorta since circumferential stress-strain was only evaluated and aortic wall dilation was considered. The transition strain, however, was shown to be independent of the aortic pressure and can, thus, serve as a clinically relevant parameter and be obtained noninvasively using ultrasound-based motion estimation techniques.

Transmural stresses and strains (σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz} , ε_{rr} and $\varepsilon_{\theta\theta}$) distributions were estimated using the calculated material parameters from our methodology (ε_{θ}^T , E_1 , E_2 , and E_3) with increased quasi-statically aortic pressures. We assumed the aortic wall to be plane strain with linear, elastic, homogeneous, isotropic material. This simple model represents a correlated results, i.e., stresses and strains nonlinearly decrease

from inner to outer wall across the wall, to the conventional pressured cylinder analysis and previous studies on arterial wall.

In conclusion, our novel methodology can assess the stress-strain relationship of the aortic wall locally *in vivo* and quantify informative parameters which are related to vascular disease. Also, the calculated stress-strain distributions using the aforementioned parameter provide a basic idea for future implementation on more complicated geometries and anisotropies.



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในหลอดเลือด แบบโดมินอลเอออร์ตา								
ผู้เขียน	น.ส.อัสวีณี คำนพินิจ								
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)								
คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	<table> <tr> <td>ศ.ดร.ประดิษฐ์ เทอดทูล</td> <td>อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก</td> </tr> <tr> <td>ผศ.ดร.ภัทรพร กมลเฟ็ชร์</td> <td>อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม</td> </tr> <tr> <td>ผศ.ดร.ยศธนา คุณาธร</td> <td>อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม</td> </tr> <tr> <td>ผศ.ดร.คันสนีย์ เอื้อวิริยะพันธ์กุล</td> <td>อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม</td> </tr> </table>	ศ.ดร.ประดิษฐ์ เทอดทูล	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผศ.ดร.ภัทรพร กมลเฟ็ชร์	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ยศธนา คุณาธร	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.คันสนีย์ เอื้อวิริยะพันธ์กุล	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ศ.ดร.ประดิษฐ์ เทอดทูล	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก								
ผศ.ดร.ภัทรพร กมลเฟ็ชร์	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม								
ผศ.ดร.ยศธนา คุณาธร	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม								
ผศ.ดร.คันสนีย์ เอื้อวิริยะพันธ์กุล	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม								

บทคัดย่อ

ค่าความแข็งของหลอดเลือดสามารถบ่งชี้ถึงสภาวะเกิดโรคของผนังหลอดเลือดได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามตัวแปรเพียงค่าเดียวไม่พอเพียงที่จะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ซับซ้อนของเนื้อเยื่อ ที่มีองค์ประกอบหลากหลายแบบไม่เป็นเชิงเส้นดังเช่นหลอดเลือดเอออร์ตาได้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบใหม่เฉพาะจุดในสิ่งมีชีวิต และนำเสนอตัวแปรเชิงการรักษาแบบไม่ผ่าตัดที่อธิบายอัตรากิริยาเชิงกลระหว่างองค์ประกอบของผนังหลอดเลือด

สมมติฐานของการศึกษานี้คือ การเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในแนวเส้นรอบวงเกิดจากการเสริมกันระหว่าง อิลาสตินและคอลลาเจน ซึ่งสามารถนิยามการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ในพจน์ของความเครียดแบบไม่ผ่าตัด ในรูปของความเร่งของผนังในแนวรัศมีหรือความเครียดแปรเปลี่ยน (ε_θ^T) โดยกำหนดให้แบบจำลองเชิง

ปรากฏการณ์อยู่ในรูปแบบสปริงสองตัวต่อในแนวนอน จากแบบจำลองนี้สามารถคำนวณค่ายังโมดูลัสได้สามค่า คือ ค่ายังโมดูลัสที่สอดคล้องกับชั้นอีลาสติก (E_1) ค่ายังโมดูลัสที่สอดคล้องกับอีลาสตินและเส้นใยคอลลาเจน (E_2) และค่ายังโมดูลัสที่สอดคล้องกับค่าเส้นใยคอลลาเจน (E_3)

การศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลหลอดเลือดเออบโดมินอลเออร์ตาจากหนูที่ปรกติและรักษาด้วยแอนกิโอเทนซินทู (Angiotensin II) โดยใช้ความดันเออร์ตาจากการสอดวัดและเส้นผ่านศูนย์กลางของผนังหลอดเลือดเออร์ตาแบบเฉพาะจุดจากการใช้เทคนิคครอสคอร์ริเรชัน (cross-correlation) ด้วยสัญญาณอัลตราซาวด์ความถี่วิทยุ 30 เมกะเฮิร์ตและอัตราการเก็บข้อมูล 8 กิโลเฮิร์ต ด้วยเทคนิคดังกล่าวสามารถแสดงทั้งค่าความเค้นแปรเปลี่ยนและค่ายังโมดูลัสทั้งสามของหลอดเลือดที่ปรกติและเกิดโรคแบบสองมิติได้

จากผลการทดลอง สามารถสังเกตพบค่าการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นโค้งความเค้นและความเครียดในแนวเส้นรอบวงได้เป็นครั้งแรกในสิ่งมีชีวิต ภายใต้เงื่อนไขในเชิงสรีรศาสตร์ ค่าความเค้นแปรเปลี่ยนในกรณีรักษาด้วยแอนกิโอเทนซินมีค่าระดับความเค้นที่ต่ำกว่าแบบปรกตินั้น คือ 0.012 ± 0.004 และ 0.029 ± 0.006 ตามลำดับ ค่ายังโมดูลัสของกรณีหลอดเลือดปรกติ E_1 , E_2 และ E_3 มีค่าเท่ากับ 69.7 ± 18.6 , 214.5 ± 65.8 และ 144.8 ± 55.2 กิโลปาสคาล ส่วนกรณีของหลอดเลือดที่ใช้แอนกิโอเทนซินมีค่าเท่ากับ 222.1 ± 114.8 , 775.0 ± 586.4 และ 552.9 ± 519.1 กิโลปาสคาลตามลำดับ ค่าความเค้นแปรเปลี่ยนและค่ายังโมดูลัสของสองกลุ่มมีค่าแตกต่างกันเพราะการแปรเปลี่ยนของโครงสร้างและปริมาณขององค์ประกอบของผนังหลอดเลือด การลดทอนลงของชั้นอีลาสติก และการสร้างตัวของคอลลาเจนเนื่องจากผลของการรักษาด้วยแอนกิโอเทนซิน ในกรณีนี้ ค่ายังโมดูลัสที่ทำได้แสดงเพียงค่าคุณสมบัติเชิงอีลาสติก ไอโซโทรปิก แบบไม่มีความหนืดรวมด้วยเมื่อหาเพียงค่าความเค้นและความเครียดในแนวเส้นรอบวงและพิจารณาเฉพาะช่วงการยืดออกของหลอดเลือดเออร์ตาเท่านั้น อย่างไรก็ตามค่าความเค้นแปรเปลี่ยนนี้ไม่ขึ้นกับความดันเออร์ตาและเป็นตัวแปรเชิงการรักษาที่แบบไม่ผ่าเปิดได้โดยใช้เทคนิคการประมาณค่าการเคลื่อนที่จากพื้นฐานของอัลตราซาวด์

การกระจายตัวของความเค้นและความเครียดข้ามผ่านผนัง (σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz} , ε_{rr} และ $\varepsilon_{\theta\theta}$) สามารถประมาณค่าได้โดยใช้ค่าคุณสมบัติที่คำนวณได้ (ε_0^T , E_1 , E_2 , และ E_3) จากงานวิจัยนี้กับความดันเออร์ตาที่เพิ่มขึ้นแบบกึ่งสถิต หากอนุमानให้ผนังหลอดเลือดเออร์ตาเป็นปัญหาแบบระนาบความเค้น (Plane strain) และเป็นวัสดุแบบไอโซโทรปิกอีลาสติกเชิงเส้นที่สม่ำเสมอแบบจำลองอย่างง่ายนี้สามารถแสดงผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันกับการวิเคราะห์คำนวณจากที่รับความดันแบบธรรมดาและงานวิจัยก่อนหน้านี้ นั่นคือ ความเค้นและความเครียดลดลงอย่างไม่เป็นเชิงเส้นข้ามผ่านผนังจากผนังส่วนในไปสู่ผนังส่วนนอกของหลอดเลือด

โดยทั่วไปแล้ววิธีการแบบนี้สามารถเข้าถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของผนังหลอดเลือดเอออร์ตาแบบเฉพาะจุดในสิ่งมีชีวิต และสามารถหาค่าตัวแปรที่มีข้อมูลที่สัมพันธ์กับโรคหลอดเลือด อีกทั้งการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดที่ประมาณค่าได้ ค่าคุณสมบัตินี้จากเทคนิคดังกล่าวยังให้แนวคิดพื้นฐานสำหรับการประยุกต์ใช้รูปร่างที่ซับซ้อนและความไม่เป็นไอโซโทรปิกเข้าร่วมได้ในอนาคต



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved