บทที่ 3
ความยืดหยุ่น
(Elasticity)

1. คุณสมบัติความยืดหยุ่น

เราเคยคุ้นกับคำว่า **ความเค้น** (Stress) และ**ความเครียด** (Strain) ซึ่งเรามักจะใช้สับเปลี่ยนกันในระหว่าง 2 คำนี้ สมมติว่าท่านดึงแผ่นยาง อณูตามแนวหน้าตัดของแผ่นยางจะยึดดึงดูดกันไว้ และออกกำลังที่จะต้าน หรือ**คงพลังไว้** เราให้นิยามความเค้นที่ยืดออกไปนี้ว่า **พลังคงรูปเดิมต่อหน่วยพื้นที่** ฉะนั้น พลังคงรูปเดิมเป็น 10 Lb-wgts. และถ้าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นยางเป็น 0.10 ตร.นิ้ว **ความเค้นที่ยืดออกไป** (Stretching Stress) จะเป็น 1,000 Lb-wgts/(in.)^2

จากสูตร

$$\text{ความเค้นที่ยืดออก} = \frac{\text{พลังคงรูปเดิม}}{\text{พื้นที่หน้าตัด}} = \frac{F}{A}$$

คำว่าความเครียด (Strain) หมายถึง **ความผิดรูป** สมมติว่าแผ่นยางยาว 6 นิ้ว และสมมติท่านดึงยืดออกไปเป็น 0.12 นิ้ว ดังนั้น **ความเครียดที่ยืดออก** (Stretching Strain) คือ 0.12 นิ้ว/6 นิ้ว = 0.02 (ไม่มีหน่วย)

จากสูตร

$$\text{ความเครียดที่ยืดออก} = \frac{\text{การยืดออก}}{\text{ความยาว}} = \frac{e}{L}$$

สมมติท่านดึงหมากฝรั่งแล้วปล่อยมันจะไม่หดตัว แต่จะผิดรูปไปในเชิง**พลาสติก** (Plastic) ลองดึงแผ่นยางดูบ้างแล้วปล่อยยางจะรัดกลับเกือบเข้าสู่สภาพเดิม ยางมีลักษณะยืดหยุ่นมากกว่า**หมากฝรั่ง** ฉะนั้น จึงได้คำนิยามความยืดหยุ่นดังนี้

"ความยืดหยุ่น (Elasticity) คือ คุณสมบัติของเทห์วัตถุที่พยายามจะคงรูปขนาดเดิมของมันไว้ เมื่อได้รับความเค้นให้ผิดรูปไป"

ความรู้จากพฤติกรรมทางยืดหยุ่นของหินก็เพื่อใช้แก้ปัญหาเป็นอันมากในภูมิฟิสิกส์ (Geophysics) ที่สำคัญเป็นพิเศษ คือ ความสัมพันธ์ร่วม (ซึ่งต่อไปจะเรียกสหสัม-

พันธ์) ของอัตราความเร็วคลื่น ความสั่นสะเทือนของโลกกับอัตราความเร็วที่คำนวณได้จากการรังวัดความยืดหยุ่นของหินตัวอย่างในห้องทดลอง การเปรียบเทียบเช่นนั้นทำให้ได้หลักฐานโดยตรง และง่ายที่สุดเกี่ยวกับองค์ประกอบของส่วนต่าง ๆ ของโลกที่เข้าไปรังวัดโดยตรงไม่ได้

ความเค้นอัดตัว หรือกำลังดึง (Compressive Stress or Tensile)

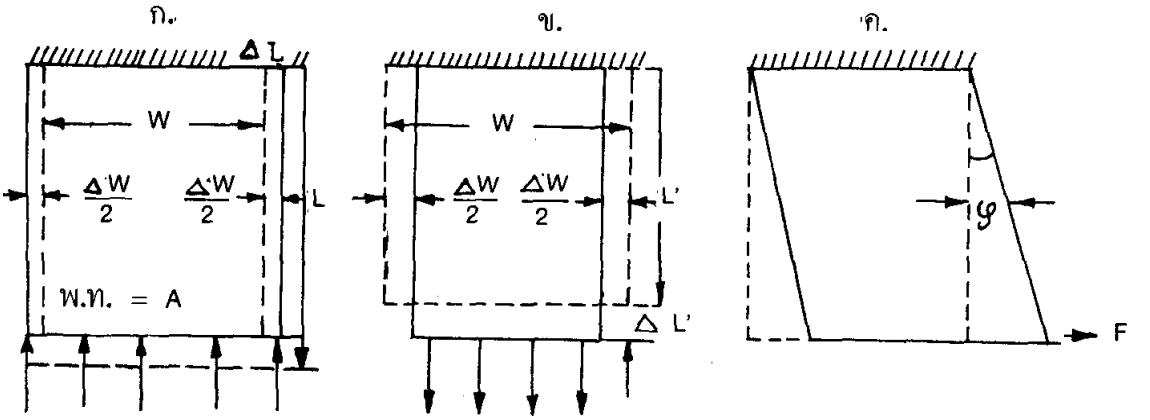
หากกำลังที่กระทำต่อพื้นที่ ซึ่งกำลังนั้นพุ่งตั้งได้ฉากโดยตรงต่อพื้นที่นั้นเรียกว่า **ความเค้นอัดตัว หรือกำลังดึง** ทั้งนี้ ย่อมแล้วแต่ว่ากำลังนั้นออกแรงออกไปจาก หรือเข้าไปในเทห์วัตถุที่แรงนั้นกระทำ)

ความเค้นทางข้าง (Shearing Stress)

หากกำลังที่กระทำต่อพื้นที่นั้นขนานไปกับพื้นที่เรียกว่า **ความเค้นทางข้าง** คือจะทำให้พื้นที่นั้นย้วยไปทางข้างตามทิศทางที่ออกแรง

สำหรับ**กำลังดึง**ทำให้เทห์วัตถุยืดออก เพิ่มความยาวออกไป ส่วน**ความเค้นอัดตัว**กลับทำให้เทห์วัตถุสั้นเข้า ส่วน**ความเค้นทางข้าง**ทำให้ผิดรูปย้วยไปทางข้าง

อัตราส่วนของการยืดออก หรือหดเข้าให้เป็นจำนวน ΔL อันเนื่องมาจาก**ความเค้น** ต่อความยาวเดิม L ก่อนจะนำเอาความเค้นมาใช้นั้นให้นิยามเป็น **ความเครียดทางยาว** c_L มุมความผิดรูป φ เกิดจากความเค้นทางข้างเรียก **ความเครียดทางข้าง** ดังในรูป



รูปที่ 3.1

ซึ่งทั้ง (ก), (ข) และ (ค) ความเค้นต่าง = $\frac{F}{A}$

เส้นประแสดงถึงก่อนมี**การผิดรูปทางยืดหยุ่น**

ความเครียดทางยาว $c_L = \frac{\Delta L}{L}$ หรือ $\frac{\Delta L'}{L'}$

2. แรงภายในโลก (Forces in the Earth)

ปัญหาใหญ่ของธรณีวิทยาอันหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาเสมอก็คือ แรงที่ทำให้เกิดภูเขา แม้จะมีข้อสมมติฐานมากมายที่ตีพิมพ์กันออกมาก็ตาม เรื่องนี้ก็ยังแก้ไม่ตก เพราะแต่ละข้อสมมติฐานมีข้อคัดค้านขัดแย้งอยู่มาก

มีกลุ่มแรงอยู่สองกลุ่มที่มีผลกระทบกระเทือนต่อการพัฒนาวิทยาการด้านนี้ คือ

1) แรงต้านต่าง ๆ ในระยะเวลายาวนาน เช่น แรงที่เกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในโลก ซึ่งแรงเหล่านี้เกี่ยวโยงถึงการหมุนรอบตัวเองของโลก หรือแรงที่ขึ้นอยู่กับข้อเท็จจริงของเปลือกโลกที่มิได้อยู่ในภาวะสมดุลตามแรงกดของของเหลว

2) แรงกลุ่มที่ 2 เปลี่ยนแปลงอย่าง**รวดเร็วสัมพันธ์กับเวลา** เช่น แรงที่เกิดจาก **กรรมวิธีทางเคมี,** การตกผลึก หรือการ**หลอมละลาย** การกัดเซาะ หรือกษัยการ (Erosion) และการตกตะกอนจะก่อกวนภาวะสมดุลของเปลือกโลก แม้จะเป็นแรงต้านที่ใช้ระยะเวลายาวนานเมื่อเปรียบกับประวัติมนุษยชาติ แรงแต่ละอย่างเมื่อเทียบกับประวัติโลกแล้วก็จัดว่าเป็นตอนที่สั้นมาก ความจริงอันนี้รวมไปถึงการก่อตัวของมวลกระโปะก้อนน้ำแข็งในระหว่างยุคน้ำแข็ง และการละลายในภายหลัง การเปลี่ยนแปลงแต่ละปีที่รวดเร็วกว่าก็ย่อมก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพืชพันธุ์ และเกิดการแจกแจงของความกดอากาศทั่วโลก พื้นที่มีความกดต่ำก็จะไหลไปตามพื้นผิวโลก และน้ำขึ้นลงมีผลในระยะเวลาสั้นกว่า

จากการเริ่มศึกษาค้นคว้ากำเนิดของภูเขา แนวความคิดว่าภูเขาเป็นผลจากการหดตัวของโลกอันเนื่องจากการศึกษาถึงการเย็นตัวของมัน หากตัวโลกหดชั้นแข็งภายนอกสุดจะถูกกดในทางแนวนอน ความกดนี้ก่อให้เกิด**ความเค้น** เนื่องจากชั้นนอกสุดของเปลือกโลกมีคุณสมบัติทางยืดหยุ่นแตกต่างกันจึงไม่จำเป็นต้องไปในทางแนวนอน ผลของความร้อนทางกัมมันตภาพรังสีจะหน่วงความเย็นของโลกให้ช้าลง

ความเย็นลงของโลกจะต้องทำให้เกิด**ความเครียด** เพราะขณะนี้บนพื้นผิวไม่มีการเย็นตัวอีกแล้ว แม้กระทั่งบางส่วนที่ลึกมาก ๆ ก็ยังไม่คำนึงถึง ต้องเป็นระดับความลึกขนาดหนึ่งหรือไม่ก็ตรงพื้นที่เย็นตัวลงอย่างสูงสุด หรือชั้นที่หมด**ความเครียด**

แรงที่เกิดขึ้นมาจากหลายทางเช่นนี้หากแกนโลกเลื่อนไป จะกระเทือนต่อภาวะ **สมดุลย์** แต่แรงต่าง ๆ มักมีทางโน้มคงภาวะสมดุลย์เดิมไว้

3. การไหลของความร้อน (Heat Flow)

พลังความร้อนที่ปรากฏเห็นชัดในการระเบิดของภูเขาไฟย่อมเป็นประจักษ์พยานอย่างไม่ผิดพลาดถึงอุณหภูมิเฉพาะแห่งภายในโลก ชั้นลาวา (Lava) และเถ้าถ่านบอกให้เรา

ได้ทราบถึงการเกิดภูเขาไฟระเบิดตลอดยุคธรณี แม้ในบางพื้นที่ที่ไม่มีภูเขาไฟระเบิดก็มีความร้อนรั่วทะลุออกมาสู่พื้นผิวโลกอย่างไม่น่าเชื่อ ตามที่ชาวเหมืองแร่ และผู้ทำการเจาะผิวโลกทราบ คืออุณหภูมิของโลกจะเพิ่มขึ้นตามความลึก (ภายใต้บริเวณแถบตื้น ๆ ที่ได้รับผลกระทบกระเทือนจากการแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิพื้นผิวตามฤดูกาล และการแปรเปลี่ยนจากการไหลของน้ำบนดิน) อุณหภูมิที่สูงขึ้นตามความลึกหมายถึงการไหลของความร้อนออกไปสู่ภายนอกตามกรรมพิธีที่ทราบกันคือ **"สื่อการชักนำความร้อน"** (Heat Conduction) ตามประวัติโลกกว่าหลายพันล้านปี **"สื่อการชักนำความร้อน"** คาดว่ามีมากกว่า $\frac{9}{10}$ ของการถ่ายเทความร้อนไปสู่พื้นผิว ทางทฤษฎีของอุณหภูมิภายในโลกนั้นอัตราความสูญเสียความร้อนที่พื้นผิวปรากฏว่าเป็นภาวะ**แนวต่อที่สำคัญ ฉะนั้น แนวความคิดเกี่ยวกับอุณหภูมิภายในโลกจึงนำมาพิจารณาอย่างกว้างขวางในการอธิบายขยายความปัญหาทางธรณีที่สำคัญ ๆ บางอย่าง เช่น ตัวกำเนิดของแมกมา** (Magmas), ลาวา (Lava) และการละลายของสินแร่ที่เข้มข้น เป็นตัวปัญหาให้เกิดความร้อนหลัก ส่วนอื่น ๆ เช่น การหักของเปลือกโลก, การโก่งงอ, กลไกของแผ่นดินไหว และการก่อตัวของภูเขามีส่วนแปลงพลังความร้อน และพลังความโน้มถ่วงไป**สู่แบบพลังจักรกล** (Mechanical Form) จากปัญหาทั้งหมดนี้การศึกษาเรื่องความร้อนจึงนำไปสู่รากฐานของความลึกลับอันมหาศาลทางธรณี

3.1 การไหลของความร้อนทั้งหมด

งานส่วนใหญ่เกี่ยวกับการไหลของความร้อนที่ศึกษากันมาจนถึงปัจจุบันนั้นมุ่งไปสู่ปัญหาอันแรกที่ปรากฏเห็นได้ชัดก็คือ **"การค้นหาชั้นของขนาดความสูญเสียความร้อนทั้งหมด"**

ค่าปานกลางของอัตราการไหลของความร้อน (Heat Flux) ไปสู่พื้นผิวยังเหลืออยู่ใกล้ ๆ กับ 40 แคลอรี/ซม.^{2}/ปี หรือเมื่อคิดถึงทั่วทั้งโลกก็ประมาณ 2×10^{20} แคลอรี/ปี ในศตวรรษที่ 19 เชื่อแน่ว่าความสูญเสียความร้อนจากภายในโลกนี้ต้องทำให้เกิดความเย็นลงไปอย่างช้า ๆ นับจากอุณหภูมิเริ่มแรกทีเดียว ทฤษฎีที่ว่าภูเขาซึ่งโก่งตัวขึ้นไปอันเป็นผลมาจากการเย็นตัว และการหดย่นของส่วนภายในโลกนั้น นับเป็นการลำดับขั้นตอนตามธรรมชาติจากแนวความคิดอันนี้ จากการค้นพบการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสี แล้วติดตามมาด้วยการเปลี่ยนพลังนิวเคลียร์ไปสู่พลังความร้อน และการค้นพบการปรากฏมีธาตุกัมมันตภาพรังสีในหินธรรมดา จึงเชื่อว่าการสูญเสียความร้อนทั้งหมดไปนั้นอาจถ่วงดุลย์ด้วยความร้อนทางกัมมันตภาพรังสี หรือไม่ก็อุณหภูมิภายในโลกอาจทวีเพิ่มมากขึ้น อันนี้จะนำไปสู่ทฤษฎีการเคลื่อนตัวชักนำอันมหาศาลขึ้นภายในชั้นหินแมลทีล นี่เป็นเหตุผลอันหนึ่งที่จะตอบเรื่องเกี่ยวกับการแจกแจงธาตุกัมมันตภาพรังสีเฉพาะบางส่วนภายในโลกตลอดยุคธรณี

อันหนึ่งที่นำเข้าไปสู่ปัญหานี้โดยใช้วิธีรังวัดการมีกัมมันตภาพรังสีของพวกหินที่สามารถจะล้วงลึกเข้าไปถึงได้ เรื่องนี้ยังมีงานจะต้องทำอีกมาก แต่ข้อยุติที่แน่ชัดซึ่งได้จากการศึกษา และกำหนดหาไว้ในอดีตได้สนับสนุนอย่างดียิ่งขึ้นเมื่อได้ข้อมูลใหม่ ๆ มา ประการแรก หินธรรมดาทั้งหมด เช่น หินแกรนิต (Granites), เนซิส (Gneisses), แอนเดไซด์ (Andesites) และบาซอลท์ (Basalts) มีกัมมันตภาพรังสีมากกว่าชั้นหินแมนทีล การไหลของความร้อนที่วัดได้บนพื้นผิวอาจได้มาจากการหมุนเวียนทางกัมมันตภาพรังสีในชั้นหินแกรนิตเฉลี่ยซึ่งหนาประมาณ 20 กิโลเมตร หรือหินบาซอลท์เฉลี่ยหนาประมาณ 100 ถึง 200 กิโลเมตร ส่วนใหญ่ของธาตุกัมมันตภาพรังสีของโลกแออัดอยู่ภายในซึ่งอยู่นอกเขตนั้นเข้าไปหลายร้อยกิโลเมตรในหินบางชนิด เช่น หินดูไนท์ (Dunites) สะสมตัวทางธรรมชาติของธาตุกัมมันตภาพรังสีไปสู่ระดับหนึ่ง มีอยู่น้อยที่พื้นผิว และจำนวนธาตุเหล่านี้อยู่ในหินธรรมดาน้อยกว่าถึงหลายพันเท่า หินภาคพื้นทวีปลักษณะพิเศษ เช่น แกรนิต และแกรโนดิโอไรท์ (Granodiorites) มีกัมมันตภาพรังสีเป็นสิบ ๆ เท่าของกัมมันตภาพรังสีที่มีอยู่ในหินบาซอลท์ซึ่งอาจก่อตัวเป็นเปลือกโลกแถบมหาสมุทร และแถบที่ราบต่ำก็ได้ จากตัวอย่างหินแมนทีลโบราณเชิงเคมี เช่น Chondritic Meteorites นักเคมีธรณีสนใจมาเป็นเวลานาน การรังวัดการมีกัมมันตภาพรังสีของหินชนิดนี้ เมื่อไม่นานนักช่วยสนับสนุนการสูญเสียความร้อนสู่พื้นผิว เพราะแสดงให้เห็นว่าความร้อนที่หมุนเวียนในหินแมนทีลที่มีกัมมันตภาพรังสีเท่ากับกัมมันตภาพรังสีใน Chondritic Meteorites จะต้องมีจำนวนเท่ากับความร้อนสูญเสียทั้งหมดสู่ผิวพื้น การพิจารณาเหล่านี้นำไปสู่ขั้นต่อไปเกี่ยวกับความรู้ถึงความร้อนโลก (Geothermal) ซึ่งเป็นความพยายามที่จะค้นให้พบการแจกแจงความร้อนที่พุ่งลึกลงไป และการแจกแจงทางด้านข้างจากแหล่งความร้อนที่มีอยู่ หากการแจกแจงสมนัยกันเชิงทรงกลม กรณีเช่นนี้ความพยายามดังกล่าวอาจล้มเหลว แต่ขณะนี้มีหลักฐานเป็นอันมากเกี่ยวกับการแปรเปลี่ยนทางข้างจนมีนัยสำคัญ ตราชูการแปรเปลี่ยนทางแนวนอนเช่นนั้นเป็นตัวชี้แนวทางสำคัญไปถึงชั้นความลึกของแหล่งความร้อน ความร้อนเพียงอยู่ชั้นตื้น ๆ เท่านั้นที่สามารถนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางแนวนอนอย่างรวดเร็ว ดังนั้น ข่ายสถานีการไหลของความร้อนที่มีอย่างพอเพียงจึงเป็นความต้องการเร่งด่วนที่สุดในการศึกษาภูมิฟิสิกส์โลก

3.2 การไหลความร้อนเฉพาะภูมิภาค

ความสำคัญของการกำหนดหาการไหลของความร้อนเพื่อใช้เป็นทฤษฎีทางภูมิฟิสิกส์นั้นทราบกันมานานแล้ว แต่ความก้าวหน้าดำเนินไปอย่างเชื่องช้า เพื่อเข้าใจเรื่องนี้จำเป็นต้องรู้ว่าเขาวัดการไหลของความร้อนกันอย่างไร การไหลของความร้อน

สังเกตไม่ได้โดยตรง จะต้องคำนวณโดยอาศัยผลคูณของสองจำนวน คือ **อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิตามความลึก** (Geothermal Gradient) และสัมประสิทธิ์เฉพาะถิ่นของสื่อการชักนำความร้อน (Thermal Conductivity) ในภาคพื้นทวีป การวัดอุณหภูมิกระทำกันในบ่อและในปล่องขุดหาเพชรพลอยในเหมือง และในท่อต่าง ๆ ไม่จำเป็นต้องผ่านเข้าไปถึงความลึกมาก ๆ เพียงการรังวัดขนาดความลึกไม่ถึง 150 เมตร (500 ฟุต) หรือประมาณนั้นก็อาจได้รับการก่อกวนจากการขึ้น ๆ ลง ๆ ของอุณหภูมิพื้นผิว จากการไหลของน้ำผิวดิน หรือจากภูมิประเทศที่ไม่ราบเรียบ ณ ทุกกรณีจะต้องระมัดระวังที่จะไม่ให้ได้รับการกระทบกระเทือนจากกรรมวิธีเจาะ หรือการระบายอากาศ หรือการก่อกวนอื่นที่เกี่ยวข้องกับการเปิดช่องใต้พื้นผิวโลกลงไป ปกติการวัดสื่อการชักนำความร้อนกระทำกันในห้องทดลองจากตัวอย่างที่รวบรวมมาจากการวัดอุณหภูมิเป็นช่วง ๆ ตามแนวยืน หรือไม่ก็ในช่วงที่ไม่ห่างกันนัก หินเป็นตัวชักนำความร้อนเลวเชิงสัมพัทธ์ ความเคลื่อนคลาดที่แลเห็นได้มักปรากฏอยู่เสมอในการวัดการชักนำความร้อนในห้องทดลอง ที่สำคัญมักมาจากการมีตัวอย่างไม่พอ และเกิดจากความแตกต่างเป็นระบบจากตัวอย่างธรรมดาโดยปกติประกอบด้วยชั้นหินทางแนวนอนที่เป็นเอกรูป ซึ่งใช้เป็นหลักในการตีความ

โอกาสจะได้รับอัตราการเพิ่มอุณหภูมิตามความลึก และข้อมูลการชักนำ ณ ที่เดียวกันมีน้อย ที่จริงก่อนปี 1939 การกำหนดหาชนิดนี้ไม่กระทำกัน ซึ่งขณะนั้น Bullard ในอาฟริกาใต้ และ Benfield ในอังกฤษสามารถส่งผลการรังวัดครั้งแรกให้ ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาการกำหนดหาได้กระทำกันอย่างมากมายในภาคพื้นทวีปทั้งหมด ยกเว้นอเมริกาใต้และแอนตาร์กติกา แต่กลับไม่มีสถานีใดบนบกที่มีค่าความแน่น (Density) อย่างเพียงพอเพื่อได้ความสหสัมพันธ์กับโครงสร้างทางธรณี หรือกับข้อมูลทางภูมิฟิสิกส์ เช่น อัตราความเร็วสั่นสะเทือนโลก หรือสนามแม่เหล็ก และสนามความโน้มถ่วงโลก ในระยะสองสามปีที่ผ่านมาจึงได้ขะมักเขม้นพยายามแก้ไขสถานการณ์อันนี้ โอกาสมากมายจากการใช้ประโยชน์ของบ่อที่ทำการสำรวจ และปล่องต่าง ๆ ที่เจาะลงไป แต่ก็จะต้องได้รับการปรับปรุงเรื่องสายการสื่อสารระหว่างผู้ทำการขุดและนักภูมิฟิสิกส์เพื่อให้ได้ผลดีที่สุด อย่างไรก็ตาม แม้จะได้ใช้ปล่องที่ขุดเพื่อจุดมุ่งหมายอื่น ๆ แต่ก็ยังมีพื้นที่บกอย่างกว้างขวางยังไม่ได้ทำการวัดการไหลของความร้อน แม้กระทั่งบริเวณที่ทำการขุดหาน้ำมัน หรือเหมืองแร่ต่าง ๆ ก็ยังมิได้เปิดโอกาสให้ทำการวัดการไหลของความร้อนได้อย่างหนาแน่นตามที่ต้องการ

3.3 การไหลของความร้อนภาคพื้นทวีปต่างกับภาคพื้นมหาสมุทร

จากการรวบรวมผลการรังวัดการไหลของความร้อนทั้งบนบก และในมหา-

สมุทร ปรากฏชัดถึงความแตกต่างกัน Bullard ได้เริ่มงานนี้ที่สถาบันสมุทรศาสตร์ต่าง ๆ ส่วน Von Herzen จากสถานสมุทรศาสตร์ Scripps ศึกษาทดลองในมหาสมุทรแปซิฟิก การวัดในมหาสมุทรได้เปรียบในเรื่องความเป็น**เอกรูป** และความ**คงที่**ของอุณหภูมิที่พื้นมหาสมุทร คือ ไม่มีการกระเพื่อมขึ้นลงตามฤดูกาล หรือประจำวัน และการวัดความร้อนตามความลึกอาจกระทำได้ ณ ส่วนบนสุดของโคลนเพียง 2-3 เมตรก็ได้ สามารถทะลุทะลวงเข้าไปได้ ณ พื้นที่ต่าง ๆ โดยใช้ Free-Falling Probes หรือ Coring Tubes สามารถรวบรวมตัวอย่างโคลนเพื่อวัดหาสื่อการชักนำความร้อนได้ทั้งในที่เดียวกัน หรือที่อยู่ใกล้ ได้ปรับปรุงวิธีการหาตำบลเจาะด้วยยานพาหนะทางเรือเคลื่อนที่เร็ว และใช้ทุนเพื่อกิจการนี้อย่างมหาศาล จึงทำให้สามารถศึกษาค้นคว้า และเลือกสถานที่วัดการไหลของความร้อนในมหาสมุทรได้กว้างขวาง

สหสัมพันธ์ของการไหลของความร้อนตามภูมิประเทศใต้มหาสมุทรกับอัตราความเร็วสั่นสะเทือนโลกชั้นหินแมนทีลกำลังดำเนินการศึกษาในส่วนตะวันออกของมหาสมุทรแปซิฟิก และคงจะได้กระทำในส่วนอื่นเพิ่มขึ้นอีกด้วย

จากงานนี้สิ่งหนึ่งที่น่าคิด คือ ผลงานที่ได้จากทะเลเป็น**ผลปานกลางของการไหลของความร้อน**ที่หามาได้อย่างใกล้เคียงที่สุดนั้นมีค่าเท่ากับ**ผลปานกลางของการไหลของความร้อนบนภาคพื้นทวีป** ได้ทำการวัดเพิ่มเติมอีกเพื่อหาข้อสนับสนุนการค้นพบนี้ แต่บัดนี้**ค่าปานกลาง**ในพื้นที่มหาสมุทรหาได้ดีกว่า**ค่าปานกลาง**ที่หาได้บนภาคพื้นทวีป สองภาคพื้นมีการขึ้น ๆ ลง ๆ มากมาย ลักษณะการกะเพื่อมขึ้นสูงมากจะปรากฏในพื้นที่ภูเขาไฟที่มีขนาดทางแนวนอนจำกัด ส่วนในพื้นที่มหาสมุทรบางแห่งมีค่าเล็กมาก โดยเฉพาะหุบเหวลึกตามแนวเขตมหาสมุทรแปซิฟิก

คุณภาพที่ใกล้เคียงของการไหลของความร้อนภาคพื้นทวีป และมหาสมุทรโดยเฉลี่ยแล้วทำให้หวนนึกถึง**การแจกแจงแหล่งความร้อน**จากหินของเปลือกโลก ภาคพื้นทวีปมีหินแกรนิต (Granites) และแกรโน ดิโอไรท์ (Granodiolites) ซึ่งเป็นหินธรรมดาที่มีกัมมันตภาพรังสีมากที่สุด ยิ่งกว่านั้นเปลือกโลกภาคพื้นทวีปมีความหนาถึง 35 กิโลเมตร ส่วนภาคพื้นมหาสมุทรหนาเพียง 6 กิโลเมตร หรือประมาณนั้น ดังนั้น จึงเป็นที่น่าประหลาดใจที่ได้ค้นพบค่าการไหลของความร้อนในมหาสมุทรไม่แตกต่างจากภาคพื้นทวีป เมื่อไม่นานปีมา แต่เมื่อสองสามปีนี้ทฤษฎีนำไปสู่การคาดคิดกันว่าน่าจะแตกต่างกัน 4 หรือ 5 เท่าทีเดียว จากการค้นพบอันสำคัญนี้ ยังมิได้กำหนดหาให้ได้จนเป็นที่แน่นอน แต่ทฤษฎีเก่า ๆ ต้องเปลี่ยนแปลงอีกมากอย่างเห็นได้ชัด

4. แหล่งความร้อนใหญ่

แหล่งกำเนิดความร้อนภายในโลกอธิบายว่า ได้จากข้อสมมติฐานต่าง ๆ แต่ปัจจุบันแหล่งความร้อนมูลฐานถือหลัก 2 ประการ คือ

4.1 กัมมันตภาพรังสี

4.2 ความยืดหดจากความถ่วง

นอกจากข้อสมมติฐานทั้งสองยังเกิดข้อสมมติฐานใหม่ขึ้นอีก ซึ่งสมมติเอาว่าความร้อนของโลกเกิดจากแหล่งหลัก 2 ประการนั้น ตามอัตราส่วนผิดแผกกัน ได้ใช้เวลาศึกษาค้นคว้าเรื่องนี้กันอย่างมาก แต่ความจริงก็ยังคงรักษาความจริงนั้นอยู่ คือ กำเนิด และการคงความร้อนอยู่เรื่อยไปภายในโลกนับเป็นปัญหาเด่นอันหนึ่งของวิทยาการนี้ที่ยังแก้ไม่ตก

5. แหล่งความร้อนน้อย

การก่อรูปของจำนวนความร้อนเล็กน้อยภายในเปลือกโลก เชื่อกันว่าเนื่องมาจากปฏิกิริยาเชิงเคมี การขัดสีระหว่างหินหักที่อยู่ในพื้นต่าง ๆ การขยายตัวของดินอัดอยู่ในรูโปร่งความร้อนก่อตัวขึ้นได้โดยการกด และการเฉือนทางข้างและจากเหตุอื่นอีกหลายประการ

เมื่อคำนึงถึงแหล่งความร้อนน้อยเหล่านี้ Nutting ได้แสดงโดยนำเอาการอนุมาน (Deduction) ทางทฤษฎีจากข้อมูลที่ทดลอง ซึ่งการเฉือนทางข้าง และความกดไม่สู้สำคัญเท่ากับแหล่งความร้อนนัก และจากการสังเกตทดลองเมื่อเร็ว ๆ นี้ ในบ่อลึกที่ Long Beach รัฐแคลิฟอร์เนีย ได้ข้อยุติว่าอุณหภูมิในเขตการหักช่องหินอาจลดลงแทนที่จะสูงขึ้น สื่อชักนำของหินที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการเพิ่มประจุความชื้นของรอยแตกหักของหินอันมีส่วนสัมพันธ์กับหินไม่มีรอยหักนั้น ช่วยสนับสนุนแนวความคิดดังกล่าว

ปฏิกิริยาเชิงเคมีทำให้อุณหภูมิในบางเหมืองแร่หายไปอย่างไม่น่าสงสัย และการทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างปานกลางในแนวหินลึกจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลาดอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัดในที่สุด

Adams ทำการคำนวณพบว่าน้ำที่ผุดขึ้นมาตามรอยแตกหินจากความลึก 3.5 กิโล-เมตร ซึ่งใช้ความกดประมาณ 1,000 เมกะบาร์ส (Megabars) จะทำให้เกิดอุณหภูมิเพิ่มขึ้นกว่า 20° ซ. ขณะที่อุณหภูมินั้นส่งผ่านสู่พื้นผิวดิน

6. แนวเขตระหว่างเปลือกโลกแข็งกับชั้นหินแมนทิลที่ยืดหยุ่น

เรายังต้องเกี่ยวข้องกับวิชาการสำคัญ ๆ อยู่ต่อไป โดยเฉพาะคำนิยามของเปลือก

โลกแข็งกับแนวเขตระหว่างเปลือกโลกกับชั้นหินแมนทึลซึ่งมีลักษณะคล้ายพลาสติกนั้น ซึ่งนำไปสู่ปัญหายุ่งยากถึงความสัมพันธ์ทางความเครียดกับความเค้น เราจะนิยามเปลือกโลกแข็งว่าเป็นส่วนของโลกที่มีปฏิกิริยาเชิงยืดหยุ่นต่อ**ความเค้น**ทั้งปวง หรือถ้าจะให้ดียิ่งขึ้น คือ **ต่อความต่างทางความเค้นทั้งหลาย** ซึ่งความเค้นทั้งหมดนี้ต่ำกว่าขีดจำกัดยืดหยุ่นค่อนข้างสูง เช่น บางทีมากกว่า 1,000 กิโลกรัม/ซม.^{2} แม้ความต่างทางความเค้นจะเกิดขีดจำกัดต่อการผิดรูปเนื่องจากการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกรวมถึงการก่อให้เกิดความโค้งงอตามยุคธรณี และชั้นหินเปลือกโลกที่หักชั้นก็ตาม บางทีจะปลอดภัยถ้าจะสมมติเอาเสียว่า **ความเค้นจะไม่เกินขีดจำกัดความยืดหยุ่น**

ดังนั้น สำหรับภาคพื้นทวีปแนวเขตชั้นล่างของเปลือกโลกแข็งที่ให้นิยาม บางทีจะทับกับ***ความไม่ต่อเนื่องโมโฮโรวิซิค*** พบว่าระดับของภูมิภาคที่มีความถ่วงชดเชยให้เกิดภาวะสมดุลของเปลือกโลกในภาคพื้นทวีปที่ได้จากวิกัตความถ่วงนั้น จะตรงกับความหนาของเปลือกโลกแข็งประมาณ 30 กิโลเมตร ดังนั้น จึงนับได้ว่าอยู่บริเวณใกล้เคียงกับค่าความหนาเปลือกโลกถึงแนวโมโอโรวิซิค อาจคาดเอาว่าเนื่องจากความเปลี่ยน-แปลงทางองค์ประกอบเชิงเคมีทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องบางประการขึ้นในพฤติกรรมทางกายภาพ มีความน่าจะเป็นบางประการว่าแนวเขตล่างของเปลือกโลกแข็งทับกับแนวเขตร่วมโมโฮโรวิซิค

ส่วนบริเวณมหาสมุทรไม่ต้องสงสัยว่าแนวเขตล่างของเปลือกแข็งเกิดขึ้นในส่วนฐานชั้นบนสุดของชั้นหินแมนทึล ซึ่งบางทีอาจพิจารณาว่ามีเนื้อมวลสารอย่างเดียวกัน ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงจากความแข็งสู่สถานะพลาสติกจะต้องเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความกด ฉะนั้น การลดลงของเขตจำกัดทางยืดหยุ่นจะเป็นไปตามความลึกที่เพิ่มขึ้น และทำนองเดียวกันอุณหภูมิบางทีเพิ่มขึ้นทีละน้อย แม้การเปลี่ยนแปลงจะรวดเร็วเพียงไรก็ตาม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใกล้อุณหภูมิหลอมละลาย

ดังนั้น ในมหาสมุทรตามภาวะอุณหภูมิในชั้นหินส่วนบนของโลกจึงคาดว่าแนวเขตส่วนล่างแปรเปลี่ยนตามความลึก อย่างเดียวกันนี้อาจเป็นจริงกับบริเวณภาคพื้นทวีป ซึ่งแนวเขตชั้นล่างอาจเฉออกไปจากความลึกของแนวร่วมโมโฮโรวิซิค ซึ่งแนวอันนี้เองอาจแปรเปลี่ยนได้ อย่างไรก็ดี ก็คาดว่าจะมีความต่างระหว่างความลึกของแนวเขตที่มีความแข็งใต้มหาสมุทร และแนวเขตที่อยู่ใต้ภาคพื้นทวีป

7. ความกดของหิน

การรังวัดความกดของหินอาจกระทำได้เช่นเดียวกับสินแร่ บัดนี้ทราบกันว่าพิสัย

ความกดอย่างแรงต้องการเพื่อกำหนดหาคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของหิน ขณะได้รับความกดอยู่

Adams และ Williamson ให้ความสนใจต่อกรรมวิธี 2 ประการ คือ สามารถหาความกดของมวลสารที่มีโพลงอยู่ เช่น หินที่มีของเหลวล้อมรอบอยู่ภายใต้ความกด หากของเหลวสัมผัสโดยตรงกับหิน ของเหลวนั้นจะผ่านเข้าไปในรูโปร่งของหิน และจะกระทำกิริยาโดยตรงต่อเม็ดเนื้อหินนั้น ๆ ดังนั้น ความกดส่วนใหญ่จึงขึ้นอยู่กับความกดที่แยกจากกันของเม็ดหิน อย่างไรก็ดี หากของแข็งเคลือบคลุม หรือฉาบด้วยแผ่นดีบุกซึ่งน้ำซึมไม่ได้ การลดลงของปริมาตรเมื่อใช้ความกดจากน้ำจะรวมเอาผลของส่วนต่าง ๆ ของของแข็งส่วนที่มีเนื้ออย่างเดียวกันบีบตัวแน่นเข้าด้วยกัน แล้วจึงทำการวัดตัวอย่างของหินทั้ง 2 อย่าง ค่าความแตกต่างที่ได้รับทั้งสองวิธีด้วยความกดสูงนั้นจะไม่โตมาก ถ้าใช้ความกดต่ำกว่า 1,000 บาร์ ผลที่ได้นับว่าสำคัญยิ่ง ปรากฏชัดว่าการทดลองตัวอย่างที่มีสิ่งเคลือบมีมุมแบริงตรงมากกว่าบนพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นของหิน ณ ความลึกใต้ผิวโลกมาก ๆ

8. กฎการยืดออกของฮุก (Hooks's Law)

วิศวกรออกแบบสะพานแขวน หรือออกแบบของทันตแพทย์ เมื่อเซาะซอกระหว่างฟันออกจะต้องใส่ทองเชื่อมช่องห่างของฟัน ซึ่งแต่ละอย่างเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติเกาะแน่นของวัตถุ ลองพิจารณาถึงคุณสมบัติบางประการของคุณสมบัติเหล่านี้ โดยเริ่มด้วยความต้านทานที่ของแข็งยอมให้แก่แรงดึง

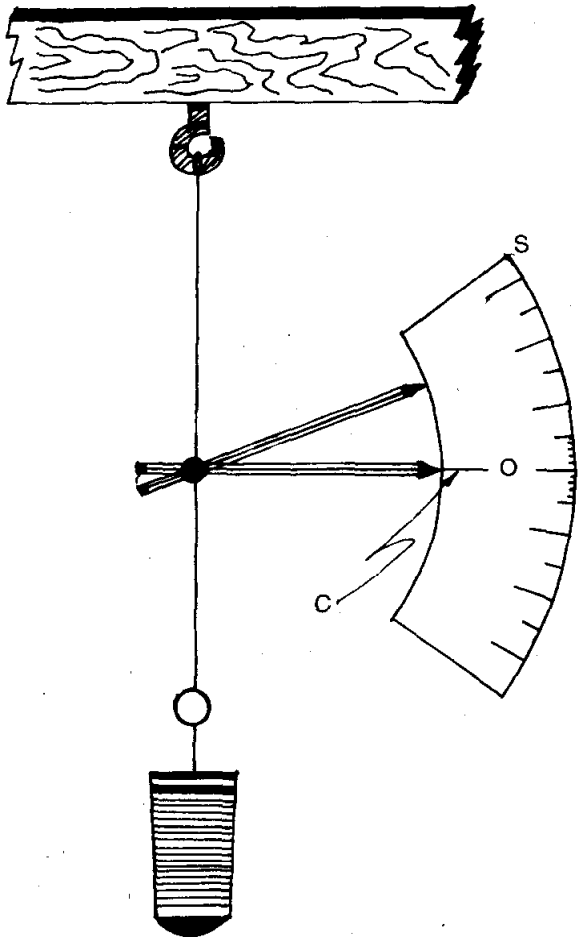
เราเคยใช้คำความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) สับเปลี่ยนกัน แต่ในวิชาฟิสิกส์ความหมายทั้งสองคำแตกต่างกัน จากที่เคยกล่าวมาแล้วสมมติว่าท่านดึงแถบยาง อณู (Molecules) ตามแนวหน้าตัด จะดึงยึดต่อกัน และออกแรงเพื่อคงรูปเดิมไว้ เราให้คำนิยามความเครียดของแรงดึงนี้ว่า**เป็นแรงคงสภาพเดิมต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่** และจากสูตร

$$\text{ความเค้นที่ยืดออก} = \frac{\text{แรงคงสภาพเดิม}}{\text{พื้นที่หน้าตัด}} = \frac{F}{A}$$

$$\text{ความเครียดที่ยืดออก} = \frac{\text{การยืดออก}}{\text{ความยาว}} = \frac{e}{L}$$

คุณสมบัติเชิงยืดหยุ่นของโลหะในเส้นลวดอาจศึกษาได้จากการใช้อุปกรณ์ง่าย ๆ ผูกสายลวดกับคานแข็งอันหนึ่ง และถ่วงด้วยน้ำหนักที่ปลายข้างหนึ่ง ดังรูปที่ 3.2

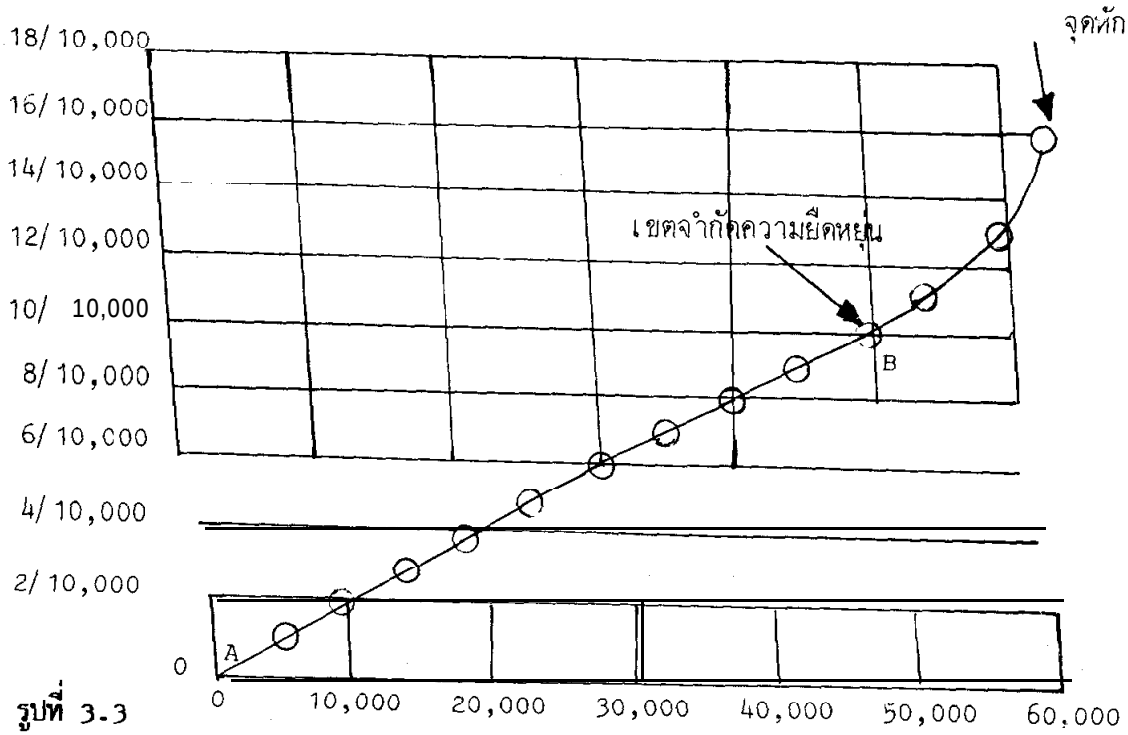
ที่ปลายข้างหนึ่งผูกแท่งวัดขณะที่ลวดยืดออกไป เมื่อท่านแขวนน้ำหนักเท่ากันหลาย ๆ ครั้งความยาวของสายลวดจะยืดออกเท่ากัน เมื่อเอาน้ำหนักออก แท่งชี้ c จะกลับชี้อยู่ที่เดิม อย่างไรก็ดี ถ้าเพิ่มน้ำหนักให้อย่างเพียงพอ ความยืดจะมากขึ้นตามลำดับ และเราเรียกว่า **"เกินเขตจำกัดความยืดหยุ่น"** ต่อไปลวดจะยืดออกถึงจุดล้า เหมือนหมากฝรั่ง และจะขาดในที่สุด



รูปที่ 3.2

ผลการทดลองเช่นนั้นจะแสดงในรูปต่อไปด้วยกร๊าฟ ปรากฏชัดว่าจนกระทั่งความเค้นถึง 50,000 ปอนด์/(นิ้ว)^2 การยืดออกจะเป็นอัตราส่วนตรงกับน้ำหนัก หลังจากเกินเขตจำกัดความยืดหยุ่น การยืดจะเริ่มทวีขึ้น และขาดเมื่อความเค้นถึง 64,000 ปอนด์/(นิ้ว)^2 ดูรูป

ในการทดลองนี้เพียงเพื่อพิจารณาความเครียดได้ส่วนสัมพันธ์กับความเค้นจนกระทั่งถึงเขตจำกัดเชิงยืดหยุ่น นั่นคือ เมื่อแรงดึงเพิ่มขึ้นสองเท่า การยืดจะเพิ่มขึ้นสองเท่าด้วย นี่คือ ลักษณะพิเศษของกฎเกณฑ์ที่สำคัญอันหนึ่งซึ่งนักวิสิกส์อังกฤษ คือ Robert Hooke กล่าวไว้ประมาณเกือบสามศตวรรษมาแล้ว



รูปที่ 3.3

"จนกระทั่งถึงเขตจำกัดเชิงยืดหยุ่น ความเครียดจะได้ส่วนสัมพันธ์ตรงกับความเค้น"

นักวิทยาศาสตร์สมัยประมาณสามศตวรรษที่แล้ว มักอิจฉา และสงสัยต่อกันยิ่งกว่าสมัยปัจจุบัน Hooke ต้องการรักษาไว้ซึ่งความเชื่อถือในการค้นพบกฎเกณฑ์อันนี้ เขาไม่ต้องการแจ้งให้ผู้ใดทราบถึงสิ่งที่เขาได้ค้นพบ เขาจะได้ดำเนินการศึกษาพิจารณาต่อโดยไม่มีใครเข้ามาแข่งขัน โดยมุ่งจะเปิดเผยต่อไปภายหลังนี้ Hooke จึงได้พิมพ์กฎเกณฑ์ของเขาขึ้นเป็นครั้งแรกด้วยการจัดแถวตัวอักษรซึ่งจัดเรียงไว้ด้วยอักษรละตินดังนี้ Ut tensio, Sic Vis (เนื่องจากการดึง ดังนั้นจึงเป็นแรง)

เมื่อวิศวกรออกแบบสะพานแขวน เขาต้องทราบลวดแต่ละเส้นยืดเท่าไรเมื่อรับน้ำหนักที่กำหนดให้ ในการคำนวณความเครียด เขาใช้ค่าคงตัวที่หาได้จากการทดลองเรียกว่า "Young's Modulus" เรานิยามคำนี้ คือ "อัตราส่วนของความเค้นที่ยืดออกต่อความเครียดที่เกิดผล"

$$\text{Young's Modulus} = \frac{\text{ความเค้นที่ยืดออก}}{\text{ความเครียดที่ยืดออก}}$$

$$Y = \frac{F/A}{e/L}$$

ฉะนั้น กฎของ Hooke จึงเขียนได้

$$\frac{F/A}{e/L} = Y$$

$$F = \frac{A.Y.e}{L}$$