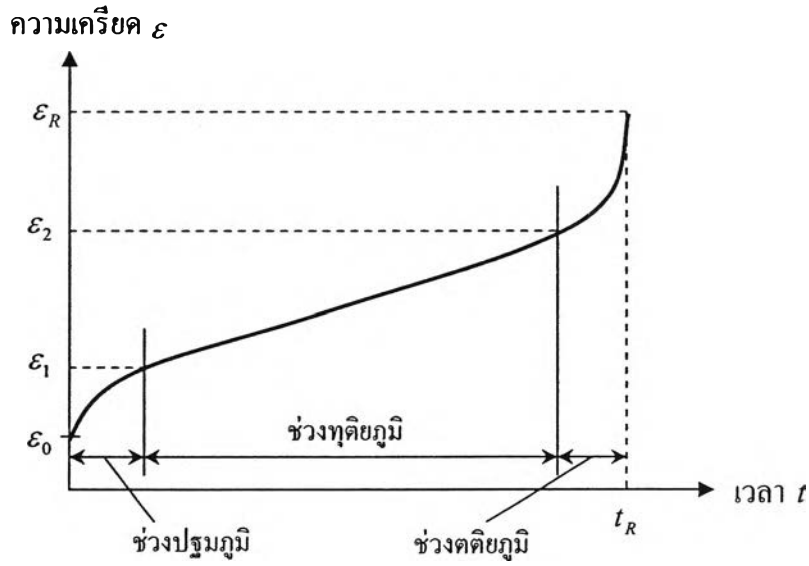
สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีสำหรับการออกแบบ

2.1 การคืบของวัสดุ

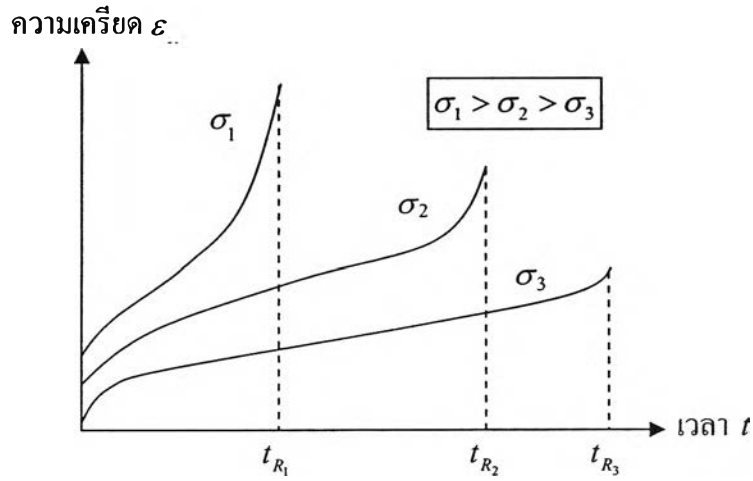
การคืบ หมายถึง การเสียรูปถาวรของวัสดุที่ภายใต้แรงและอุณหภูมิสูง การคืบมีผลเด่นชัดที่อุณหภูมิตั้งแต่ 40 เปอร์เซ็นต์ของจุดหลอมเหลวของวัสดุนั้น พฤติกรรมการคืบนิยมแสดงอยู่ในรูปของเส้นโค้งการคืบ (creep curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา ณ ความเค้นและอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ หลังจากให้ภาระกับชิ้นงานทดสอบจะเกิดความเครียด ε_0 ขึ้นทันที ช่วงการเสียรูประหว่างความเครียด ε_0 และ ε_1 เรียกว่า การคืบช่วงปฐมภูมิ (primary creep) ช่วงการเสียรูประหว่าง ε_1 และ ε_2 นั้น อัตราการคืบ (creep rate) มีค่าคงที่ (ε = constant) และการคืบช่วงนี้เรียกว่า การคืบช่วงทุติยภูมิ (secondary creep) การเสียรูปตั้งแต่ ε_2 เรียกว่า การคืบช่วงตติยภูมิ (tertiary creep) อัตราการคืบช่วงนี้จะเพิ่มขึ้นเพราะว่าความเสียหายในเนื้อวัสดุ เช่น void, crack เป็นต้น ทำให้พื้นที่รับแรงลดลง ความเค้นบนพื้นที่หน้าตัดจึงเพิ่มสูงขึ้น และอัตราการคืบเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดแตกหักที่ความเครียด ε_R และเวลา t_R



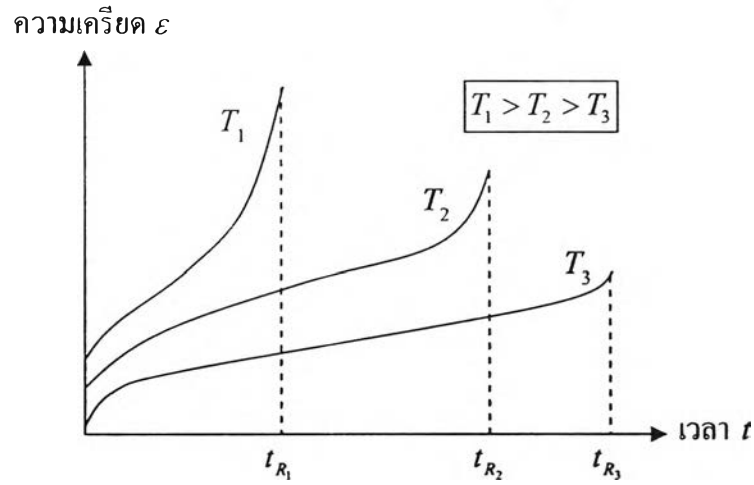
รูปที่ 2.1 เส้นโค้งการคืบ

2.2 การแสดงข้อมูลการคืบ

พฤติกรรมการคืบของวัสดุนิยมนำเสนอในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ ปัจจัยทางกลที่มีผลต่อพฤติกรรมการคืบของวัสดุ ได้แก่ อุณหภูมิและความเค้น เป็นต้น โดยทั่วไปพบว่า อายุการคืบ (creep life) t_R ลดลงเมื่อความเค้นหรืออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (6) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ รูปที่ 2.3 ตามลำดับ อย่างไรก็ดีการแสดงข้อมูลที่สะดวกสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนคือการพล็อตระหว่างความเค้นและระยะเวลาที่วัสดุเกิดความเครียดคืบขนาดต่าง ๆ กัน รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์นี้ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง จากรูปจะเห็นเส้นโค้ง 3 เส้นมีข้อความกำกับ เส้นโค้งที่มีข้อความ "แตกหัก" ใช้สำหรับคำนวณหาอายุการคืบของชิ้นส่วนที่ทราบความเค้นที่มากระทำ หรือในทางกลับกันใช้คำนวณหาความเค้นที่ยอมรับสำหรับอายุการคืบที่กำหนด เส้นโค้งอีกสองเส้นที่เหลือใช้คำนวณระยะเวลาที่ชิ้นส่วนจะมีความเครียดคืบเท่ากับที่กำหนดในกราฟภายใต้ความเค้นที่มากระทำซึ่งกรณีนี้เหมาะกับการออกแบบชิ้นส่วนที่การเสียรูปคืบของชิ้นส่วนต้องอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย แม้ว่าความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.4 จะให้ความสะดวกกับการออกแบบมากขึ้นก็ตาม แต่ความสัมพันธ์ก็เป็นจริงสำหรับอุณหภูมิหนึ่ง ๆ เท่านั้น ดังนั้นหากชิ้นส่วนที่ออกแบบทำงานที่อุณหภูมิที่ไม่พอดีกับความสัมพันธ์ที่มี ผู้ออกแบบจะต้องทำการประมาณค่าภายในช่วง (interpolation) หรือการประมาณค่านอกช่วง (extrapolation) พฤติกรรมการคืบซึ่งไม่ค่อยสะดวกนัก ด้วยเหตุนี้จึงมีความพยายามอย่างมากในอดีตที่จะรวมปัจจัยทางกล (อุณหภูมิ และความเค้น) เข้าด้วยกันกลายเป็นเส้นโค้งการคืบเพียงเส้นเดียว ความพยายามนี้นำไปสู่การพล็อตข้อมูลการคืบบนกราฟที่แกนนอนเป็นพารามิเตอร์เวลา-อุณหภูมิ (time-temperature parameter) และแกนตั้งเป็นความเค้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 พารามิเตอร์เวลา-อุณหภูมิที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ พารามิเตอร์ Larson-Miller, LMP ซึ่งเขียนอยู่ในรูปของ $T(C+\log t_R)$เมื่อ T

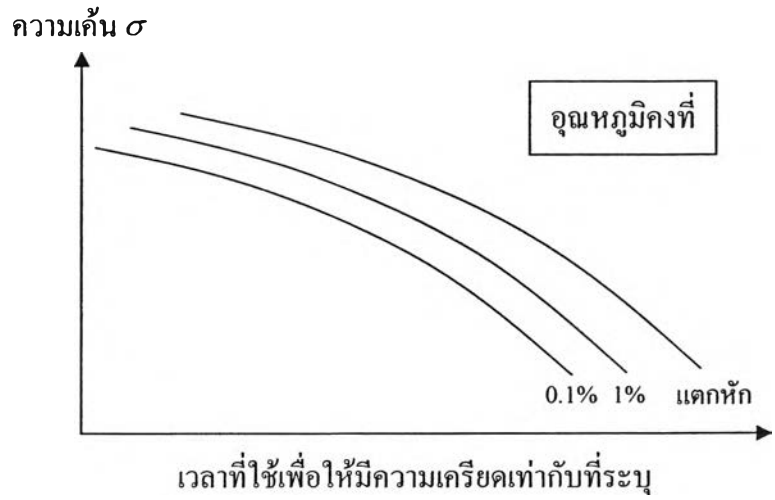


รูปที่ 2.2 ผลของความเค้นต่อพฤติกรรมการคืบ

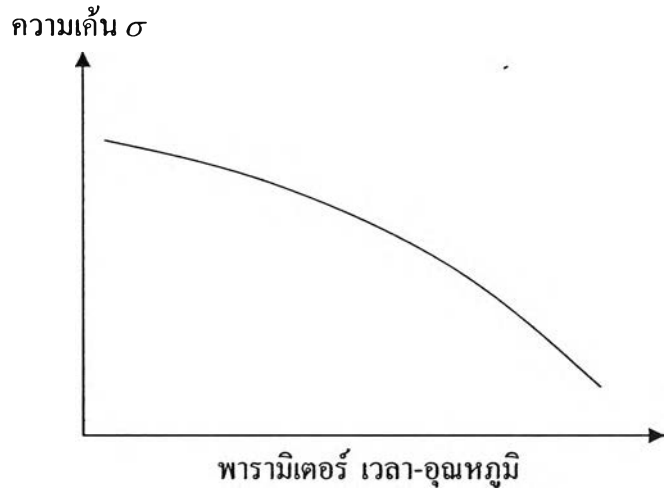


รูปที่ 2.3 ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการคืบ

คือ อุณหภูมิหน่วยเป็นเคลวิน C คือ ค่าคงที่ของวัสดุซึ่งมีค่าประมาณ 20 และ t_R คือ อายุการคืบ หน่วยเป็นชั่วโมง (*7*) นอกจากความสะดวกในการใช้งานแล้ว ความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.5 ยังมีประโยชน์กับการทำนายอายุการคืบของชิ้นส่วนที่รับความเค้นน้อย (อายุการคืบมาก) จากข้อมูลการคืบของชิ้นงานทดสอบที่รับความเค้นเดียวกันแต่อยู่ภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิใช้งานจริง



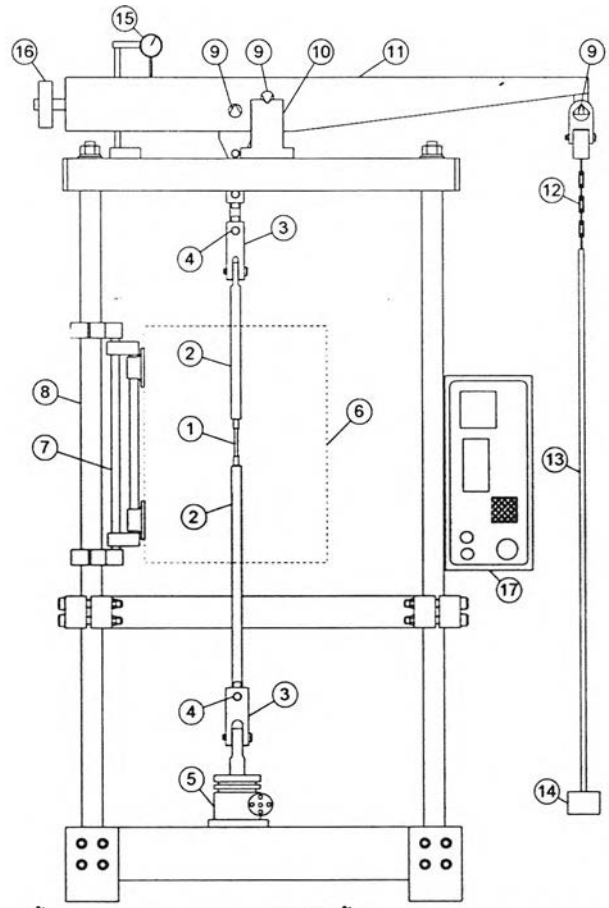
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะเวลาที่วัสดุเกิดความเครียดคืบขนาดต่าง ๆ



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอายุการคืบที่อุณหภูมิและความเค้นต่าง ๆ

2.3 การทดสอบการคืบแกนเดี่ยว

การทดสอบการคืบแกนเดี่ยวหมายถึง การทดสอบชิ้นงานภายใต้ภาระดึงแนวแกน (axial tension) โดยการทดสอบมีทั้งแบบควบคุมภาระ (ภาระคงที่) และแบบควบคุมความเค้น (ความเค้นคงที่) ข้อมูลจากการทดสอบ ประกอบด้วย ระยะยืด (elongation) ของชิ้นงานที่เวลาต่าง ๆ และอายุการคืบ ลักษณะของเครื่องทดสอบการคืบแกนเดี่ยวแสดงอยู่ในรูปที่ 2.6 จากรูปแสดงชิ้นงานทดสอบ (หมายเลข 1) ที่ถูกติดตั้งในเตา (หมายเลข 6) และรับแรงดึงซึ่งถ่ายโอนมาจากตุ้มน้ำหนัก ด้วยกลไกคานทดแรง (หมายเลข 11)



รูปที่ 2.6 เครื่องทดสอบการคืบแกนเดี่ยว

2.4 การออกแบบชิ้นส่วนที่ใช้งาน ณ อุณหภูมิสูงด้วยเกณฑ์ความเค้น

เนื่องจากอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวมีชิ้นส่วนที่ต้องรับความเค้นภายหลังจากชิ้นงานขาด ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเกณฑ์การออกแบบที่เหมาะสมกับชิ้นส่วนนั้น เกณฑ์การออกแบบสำหรับชิ้นส่วนที่รับความเค้นที่อุณหภูมิสูงคือ

$$\sigma_{max} = \sigma_{allowable} \tag{2.1}$$

โดย σ_{max} คือ ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วน

$\sigma_{allowable}$ คือ ความเค้นยอมรับ (allowable stress) ซึ่งเท่ากับความแข็งแรงของวัสดุที่ต่ำที่สุดใน 6 กรณีต่อไปนี้ (*7*)

1) 25% ของค่าต่ำสุดของความต้านแรงดึงสูงสุด (ultimate strength) ที่อุณหภูมิห้อง $\sigma_{u,RT}$

2) 25% ของความต้านแรงดึงสูงสุดที่อุณหภูมิใช้งาน $\sigma_{u,HT}$

3) 67% ของค่าต่ำสุดของความต้านแรงดึงครากที่อุณหภูมิห้อง $\sigma_{y,RT}$

4) 67% ของความต้านแรงดึงครากที่อุณหภูมิใช้งาน $\sigma_{y,HT}$

5) ค่าต่ำสุดระหว่าง

5.1) 100% ของความเค้นที่ทำให้เกิดความเครียดคืบ (creep strain) 0.01% ใน 10^3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิใช้งาน $\sigma_{creep,0.01\%,10^3 h}$ และ

5.2) 100% ของความเค้นที่ทำให้เกิดความเครียดคืบ 1% ใน 10^5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิใช้งาน $\sigma_{creep,1\%,10^5 h}$

6) ค่าต่ำสุดระหว่าง

6.1) 67% ของค่าเฉลี่ยความเค้นที่อายุการคืบ 10^5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิใช้งาน $\sigma_{creep,average,10^5 h}$

6.2) 80% ของความเค้นต่ำสุดที่อายุการคืบ 10^5 ชั่วโมง (โดยการประมาณค่านอกช่วง) ที่อุณหภูมิใช้งาน $\sigma_{creep,min,10^5 h}$

2.5 การสร้างทรานสดิวเซอร์ที่มีเกจความเครียดเป็นส่วนประกอบ

เนื่องจากทรานสดิวเซอร์ที่ใช้ตรวจจับระยะยืดของชิ้นงานทดสอบเป็นชนิดเกจความเครียด ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้สร้างขึ้นเอง หัวข้อนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาเกี่ยวกับการวัดความเครียดด้วยเกจความเครียด วงจรเกจความเครียด และแนวคิดในการสร้างทรานสดิวเซอร์ที่มีเกจความเครียดเป็นส่วนประกอบ

เกจความเครียดชนิดความต้านทาน (electrical resistance strain gage) เป็นทรานส์ดิวเซอร์ที่ถูกนำไปใช้วัดความเครียดมากที่สุด หลักการวัดความเครียดของเกจความเครียดชนิดนี้ คือ เมื่อวัตถุเสียรูปเนื่องจากถูกภาระกระทำ เกจความเครียดซึ่งติดอยู่ที่ผิวของวัตถุจะเสียรูปตามวัตถุไปด้วย การเสียรูปของเกจความเครียดทำให้ความต้านทานของตัวมันเปลี่ยนไป (เพิ่มขึ้นถ้ายืดออก หรือลดลงถ้าหดเข้า) เนื่องจากเส้นลวดในเกจความเครียดมีความยาวและขนาดหน้าตัดเปลี่ยนไป ดังนั้นถ้าสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้แล้วเราจะสามารถคำนวณความเครียด ณ จุดที่ติดเกจความเครียดได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด ε และขนาดความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป ΔR ซึ่งอยู่ในรูปของ

$$\varepsilon = \frac{1}{F}\frac{\Delta R}{R} \tag{2.2}$$

โดย F คือ เกจแฟคเตอร์ของเกจความเครียด

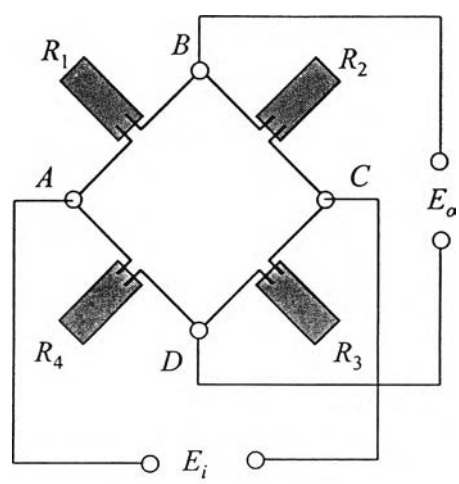
R คือ ความต้านทานของเกจความเครียด

อย่างไรก็ดี การวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเกจความเครียด ΔR นิยมวัดในรูปของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าคร่อมวงจรบริดจ์ที่มีเกจความเครียดต่ออยู่ การเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันไฟฟ้าของวงจรจะสัมพันธ์กับขนาดของความเครียดบนเกจความเครียด (สมการที่ (2.2)) แต่จะมีค่าเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อวงจรเกจความเครียด และขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนวงจร

วงจรบริดจ์ที่นิยมใช้ในทรานสดิวเซอร์ที่มีเกจความเครียดเป็นส่วนประกอบคือ วงจรแบบบริดจ์เต็ม (full bridge) ซึ่งมีลักษณะวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.7 ความต้านทาน R_1 , R_2 , R_3 และ R_4 คือ ความต้านทานของเกจความเครียด E_i คือ ความต่างศักย์ที่ป้อนวงจร และ E_o คือ ความต่างศักย์ที่วัดจากวงจรเพื่อตรวจวัดความไม่สมดุลของวงจรบริดจ์เนื่องจากความต้านทานของเกจความเครียดเปลี่ยนไป

ความต่างศักย์ E_o สามารถเขียนอยู่ในรูปของ ความต้านทานของเกจความเครียด การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน และความต่างศักย์ที่ป้อนให้วงจรได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E_o = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2}\left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}\right]E_i \qquad (2.3)$$



รูปที่ 2.7 วงจรบริดจ์เต็ม

แทนสมการที่ (2.2) ลงในสมการที่ (2.3) และกำหนดให้เกจความเครียดทั้งหมดมีความต้านทานเท่ากัน จะได้

$$E_o = \frac{E_i F}{4}\left(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4\right) \tag{2.4}$$

สมการนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นบนเกจความเครียดแต่ละตัวกับความต่างศักย์ที่อ่านจากวงจรบริดจ์ สมการที่ (2.4) นี้เป็นพื้นฐานแนวคิดของการออกแบบทรานสดิวเซอร์ที่มีเกจความเครียดเป็นส่วนประกอบ กล่าวคือ เมื่อวัสดุเสียรูปจะเกิดความเครียดซึ่งตรวจวัดได้ในรูปความต่างศักย์ และโดยการสอบเทียบเราจะทราบความสัมพันธ์ของระยะเสียรูป (หรือขนาดของแรงที่ทำให้เกิดการเสียรูป) กับความต่างศักย์ การติดเกจความเครียดบนตัวเรือน (body) ของทรานสดิวเซอร์ส่วนใหญ่จะติดในตำแหน่งที่ความเครียดมีขนาดสมมาตรกัน กล่าวคือขนาดเท่ากันแต่มีเครื่องหมายตรงข้าม เมื่อทำเช่นนี้แล้วค่าในวงเล็บในสมการที่ (2.4) จะเสริมกันทำให้ความไวของวงจรบริดจ์เพิ่มขึ้น หรือกล่าวอีกอย่างคือ ทรานสดิวเซอร์มีความไวในการตรวจวัดมากขึ้น นอกเหนือจากความไวที่มากขึ้นแล้ว การต่อวงจรแบบดังกล่าวยังช่วยชดเชยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้อย่างอัตโนมัติ กล่าวคือ ความต่างศักย์ E_o จะไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพราะเกจความเครียดทุกตัวรับความเครียดเนื่องจากความร้อน (thermal strain) ซึ่งมีขนาดเท่ากันและทิศทางเดียวกัน หากพิจารณาสมการที่ (2.4) จะเห็นว่าการเกิดความเครียดลักษณะนี้จะทำให้ค่าในวงเล็บหักล้างกันหมดไป

2.6 การประยุกต์ทฤษฎีพลังงานเพื่อคำนวณระยะแอ่นตัว

แม้ว่าการสอบเทียบทรานสดิวเซอร์จะทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทางกายภาพที่ต้องการวัดค่า (ระยะแอ่นตัว แรง เป็นต้น) กับความต่างศักย์จากวงจรบริดจ์ในทรานสดิวเซอร์นั้น แต่ในขั้นตอนการออกแบบหากผู้ออกแบบทราบความสัมพันธ์ที่แม่นตรงระหว่างปริมาณทางกายภาพที่ต้องการวัดค่ากับความต่างศักย์ (หรือความเครียดที่เกิดขึ้นบนทรานสดิวเซอร์) การออกแบบทรานสดิวเซอร์จะมีความยุ่งยากน้อยลง

ทรานสดิวเซอร์สำหรับวัดระยะเสียรูป นั้นปริมาณทางกายภาพที่ต้องการวัดคือ ระยะแอ่นตัว (ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากแรงดึง แรงบิด หรือโมเมนต์ดัด ก็ได้) โดยระยะแอ่นตัวนี้จะสัมพันธ์กับความเค้น (และความเครียด) ณ จุดที่สนใจ ความสัมพันธ์นี้สามารถหาได้หลายวิธี แต่วิธีหนึ่งที่สะดวกก็คือ วิธี Castigliano (*8*) หลักการของวิธีนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้

สมมติให้วัตถุทำจากวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นถูกภาระ $P_1, P_2, ...P_n$ กระทำ ภาระแต่ละตัวทำให้เกิดระยะแอ่นตัว $\delta_1, \delta_2, \ldots, \delta_n$ ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างระยะแอ่นตัวกับภาระที่กระทำตรงตำแหน่งที่เกิดระยะแอ่นตัวนั้นจะเขียนอยู่ในรูป

$$\delta_i = \frac{\partial U}{\partial P_i} \tag{2.5}$$

โดย U คือ พลังงานความเครียด (strain energy) ที่สะสมในวัตถุ

ในวิทยานิพนธ์นี้ หลังจากออกแบบรูปร่างทรานสดิวเซอร์วัดระยะเคลื่อนตัวแล้ว จะใช้สมการที่ (2.5) คำนวณระยะแอ่นตัว ณ ตำแหน่งติดตั้งทรานสดิวเซอร์ในเทอมของแรงที่กระทำที่จุดติดตั้ง จากนั้นคำนวณความเค้นเนื่องจากแรงที่จุดติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่ต้องการติดเกจความเครียด สุดท้ายคือคำนวณความเครียดที่ตำแหน่งติดเกจความเครียดโดยใช้กฎของฮุค ดังนั้นจะสามารถหาความสัมพันธ์แม่นตรงระหว่างระยะแอ่นตัวที่ตำแหน่งติดตั้งทรานสดิวเซอร์กับความเครียดบนทรานสดิวเซอร์ได้