

เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก: การศึกษาหลักการทำงาน และพารามิเตอร์ในการออกแบบ Thermoacoustic engine: principle of operation and design parameters

บัญชา คังตระกูล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

องครักษ์ นครนายก 26120

Tel.: (662) 02-6641000 Ext. 2055, Fax: 037-322609

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็น การนำเสนอการศึกษาหลักการทำงาน และพารามิเตอร์ในการออกแบบที่สำคัญของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบลูกสูบ ผลจากการศึกษาพบว่าเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดหนึ่งซึ่งทำงานโดยอาศัยคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นจากความต่างอุณหภูมิของรีเจนเนอเรเตอร์ เนื่องจากเครื่องยนต์ชนิดนี้มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวเพียงสามชิ้นเท่านั้น มันจึงมีโครงสร้างที่ง่ายกว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบกลไกทั่วไป อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของหลอดเสียงกับปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกขนาดเล็กพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 3 ถึง 5 โดยประมาณ

Abstract

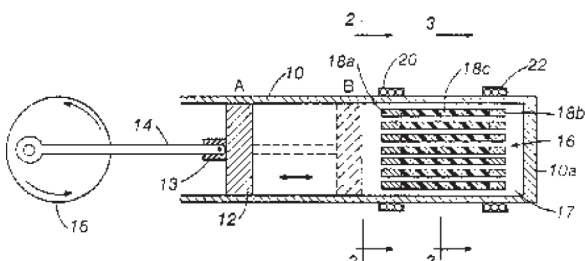
Investigation on principle of operation and principal design parameters of the piston-type thermoacoustic engine is presented. Results from this study indicate that the thermoacoustic engine is a Stirling engine operated with the sound wave created by temperature gradient of the regenerator stack. Since this engine has only three moving parts, therefore, it's construction is simpler than normal kinematic Stirling engines. The ratio of the sound tube volume and power piston displacement of thermoacoustic model engines is in a range of 3 to 5, approximately.

Keywords: Thermoacoustic engine, Lamina flow engine, External combustion engine

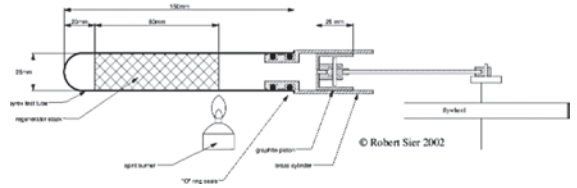
1. บทนำ

เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก (Thermo-acoustic engine) เป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling engine) แบบหนึ่ง เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเป็นที่รู้จักกันเมื่อประมาณไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา โดยในปี ค.ศ. 1984 ได้มีการจดสิทธิบัตรเครื่องจักรเทอร์โมอะคูสติกในสหรัฐอเมริกา เป็นเครื่องสูบลมความร้อน (Heat pump) ดังรูปที่ 1 ในรูปนี้ 10 คือ กระจกบ่อสูบและหลอดเสียง (Sound tube), 12 คือ ลูกสูบกำลัง (Power piston), 14 คือ ก้านสูบ, 15 คือ ล้อช่วยแรง (Flywheel), 16 และ 17 คือ ช่องร้อน, 18 คือ รีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator หรือ stack), 20 คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) อุณหภูมิต่ำ, 22 คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิสูง

เครื่องจักรนี้สามารถทำงานเป็นเครื่องยนต์ความร้อนได้ดีเท่ากับเป็นเครื่องสูบลมความร้อน และจะเรียกว่าเครื่องยนต์ความร้อนอะคูสติก (Acous-tical heat engine) เมื่อนำมาใช้เป็นเครื่องยนต์ความร้อน แห้งให้และแห้งรับความร้อนจะสลับกันกับเครื่องสูบลมความร้อน (ดูรูปที่ 2) เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีการทำงานที่เงียบกริบ เครื่องยนต์ชนิดนี้รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่า เครื่องยนต์ที่มีการไหลแบบราบเรียบ (Lamina flow engine)



รูปที่ 1 เครื่องสูบลมความร้อนอะคูสติก (Acoustical heat pump)



รูปที่ 2 เครื่องยนต์ความร้อนอะคูสติก (Acoustical heat engine) ของ Robert Sier

คุณลักษณะเด่นของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกก็คือต้องการชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่เพียงชิ้นส่วนเดียวในการทำให้เกิดงาน คือลูกสูบ เป็นลวดความซับซ้อนของกลไกเครื่องยนต์ เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นเครื่องยนต์ที่มีโครงสร้างอย่างง่าย โดยมีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่น้อยที่สุดในบรรดาเครื่องยนต์ความร้อนแบบลูกสูบทั้งหลาย

คุณลักษณะเด่นที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกก็คือการสันดาปเกิดขึ้นภายนอกกระจกบ่อสูบ เพราะฉะนั้นจึงสามารถใช้เชื้อเพลิงเป็นวัสดุที่เผาไหม้ได้อะไรก็ได้ รวมถึงความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วย

ลักษณะเด่นต่างๆที่กล่าวมาแล้วนี้เป็นเหตุผลที่สมควรจะศึกษาเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในรายละเอียดต่างๆรอบด้าน เพื่อพัฒนาไปสู่การผลิตพลังงานอย่างยั่งยืนจากแหล่งพลังงานทดแทน

2. หลักการทำงาน

ส่วนประกอบที่สำคัญประกอบด้วย Stack (ซึ่งเป็นรีเจนเนอเรเตอร์นั่นเอง ซึ่งในรูปที่ 2 ใช้ฝอยสแตนเลสเป็น Regenerator matrix) อยู่ในท่ออันหนึ่งซึ่งถูกให้ความร้อนที่ปลายด้านหนึ่ง ท่ออันนี้เรียกว่าหลอดเสียง (Sound tube) ต่ออยู่กับกระจกบ่อสูบกำลังซึ่งมีลูกสูบกำลังอยู่ใน ลูกสูบกำลังจะถ่ายทอดการเคลื่อนที่และกำลังผ่านก้านสูบไปสู่เพลาลูกข้อเหวี่ยงซึ่งมีล้อช่วยแรงเป็นตัวเก็บสะสมความเฉื่อย

หลักการการทำงานของเครื่องยนต์นี้วางอยู่บนหลักความจริงที่ว่า เมื่อมีความต่างของอุณหภูมิ (Temperature gradient) (มีปลายด้านร้อนกับปลายด้านเย็น) ในหลอดเสียง ก็จะทำให้เกิดคลื่นเสียงขึ้น และคลื่นเสียงนั้นจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนย้ายความร้อน (เรียกว่า Streaming) ไปสู่ปลายด้านเปิดของท่อ

เครื่องยนต์ในรูปที่ 2 ใช้ตะเกียงอัลกอฮอล์เป็นแหล่งให้ความร้อนที่ปลายด้านในของรีเจนเนอเรเตอร์ ความร้อนแฝงของรีเจนเนอเรเตอร์ถูกเคลื่อนย้ายไปสู่แหล่งอุณหภูมิสูง และ ไปกับอากาศที่อยู่ภายในหลอดเสียงไปสู่ลูกสูบกำลัง เหลือไว้เพียงแถบแคบๆของความร้อนในรีเจนเนอเรเตอร์ ความร้อนที่มากเกินไปจะกระจายสู่กระบอกสูบกำลังที่ต่ออยู่กับหลอดเสียง

เมื่อลูกสูบกำลังเคลื่อนที่จากศูนย์ตายล่างสู่ศูนย์ตายบนเข้ามาหาท่อเสียงด้วยความเฉื่อยของล้อช่วยแรง ลูกสูบจะผลักดันอากาศเข้าไปในหลอดเสียง การเคลื่อนที่ของอากาศนั้นจะทำให้เกิด Temporary interference บนคลื่นเสียงด้วย Doppler effects สิ่งที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ผลของ Heat streaming ช้าลง ทำให้ขอบด้านร้อน (heated edge) ของรีเจนเนอเรเตอร์กว้างเพิ่มขึ้นชั่วคราว ดังนั้นการเพิ่มความดัน (Pressure rise) จะเกิดอย่างรวดเร็ว เนื่องจากรีเจนเนอเรเตอร์มีพื้นที่รับความร้อนเพิ่มมากขึ้น

ความดันที่เพิ่มขึ้นนี้จะผลักดันลูกสูบกำลังกลับในจังหวะถอยกลับ จากศูนย์ตายบนสู่ศูนย์ตายล่าง ต่อมาความดันที่เพิ่มขึ้นนี้ร่วมกับการที่ไม่มีอากาศถูกเป่าเข้าไปหลอดเสียงทำให้ Heat streaming เคลื่อนที่กลับ แถบความร้อนที่ปลายของรีเจนเนอเรเตอร์แคบลง ส่งผลให้ความดันลดลงทำให้ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงสามารถหมุนลูกสูบกลับไปสู่หลอดเสียงอีกครั้งหนึ่ง

3. กำลังและประสิทธิภาพ

จากกฎของ Boyle และ Charles เมื่อก๊าซมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C ความดันจะเพิ่มขึ้น $1/273$ เท่า ดังนั้น ถ้าภายในหลอดเสียงมีความดันสถิต p_s ความดันพลศาสตร์สูงสุดจะมีค่าเป็น

$$p_d = p_s \Delta T/273 + p_s \quad (1)$$

เมื่อ ΔT คืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ค่าการแกว่งของความดันพลศาสตร์จะหาได้จาก

$$p_{ds} = p_d - p_s \quad (2)$$

ศักยภาพของกำลังจะมีค่าเป็น

$$P = p_{ds} A S f \quad (3)$$

เมื่อ A คือพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ S คือช่วงชักของลูกสูบ f คือความเร็วรอบของเครื่องยนต์

ประสิทธิภาพอุดมคติของเครื่องยนต์จะคำนวณได้จาก

$$E = (T_H - T_C)/T_H \quad (4)$$

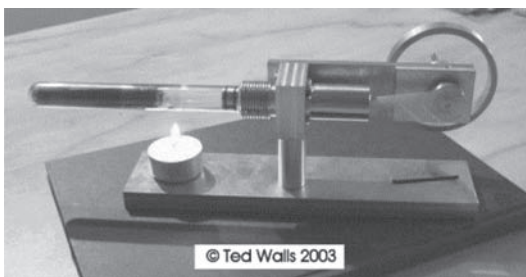
เมื่อ T_H และ T_C คืออุณหภูมิของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิสูง และ อุณหภูมิต่ำตามลำดับ

4. พารามิเตอร์ในการออกแบบที่สำคัญ

รูปที่ 2 แสดงเครื่องยนต์ที่สร้างโดย Robert Sier, สหราชอาณาจักร หลอดเสียงหรือหลอดร้อน (Heater tube) เป็นหลอดทดลอง Pyrex ใดๆก็ตาม หลอดเสียงนี้สามารถสร้างจากวัสดุอื่นๆ เช่น ท่อสเตนเลส เป็นต้น รีเจนเนอเรเตอร์เป็นฝอยสเตนเลส บางส่วนของรีเจนเนอเรเตอร์จะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วย อาจจะต้องมีการปรับตำแหน่งของรีเจนเนอเรเตอร์บ้างเพื่อให้ได้กำลังสูงสุดจากเครื่องยนต์ ลูกสูบทำจากกราไฟท์ (Graphite) กระบอกสูบทำจากทองเหลือง เพื่อลดความต้องการน้ำมันหล่อลื่น สามารถใช้กระบอกสูบและลูกสูบที่ทำจากเหล็กกล้าก็ได้ แต่ต้องมีการหล่อลื่นและควรจะจัดวางให้กระบอกสูบ

เอียงเล็กน้อย เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมันหล่อลื่นไหลเข้าไปในหลอดเลือด ล้อช่วยแรงจะต้องมีมวลมากพอสมควร เพื่อให้มีความเฉื่อยพอเพียง เครื่องยนต์ของ Sier มีปริมาตรกวาด (Swept volume) ของลูกสูบกำลัง 12.271 cc โดยมีปริมาตรของหลอดเลือด 63.814 cc หรืออัตราส่วนการอัด $CR = 5.201$

Sier พบว่ากำลังของเครื่องยนต์จะแปรผันตามปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง ในการศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ Sier จึงทำให้สามารถปรับเปลี่ยนระยะชักได้ ความร้อนที่ใช้ได้จากตะเกียงแอลกอฮอล์ วางไว้ที่ปลายของรีเจนเนอเรเตอร์ด้านลูกสูบกำลัง ในขณะที่เครื่องยนต์ทำงานปลายของรีเจนเนอเรเตอร์อีกด้านหนึ่งควรจะเป็นเครื่องยนต์จะดับถ้าให้ความร้อนมากเกินไป สำหรับเครื่องยนต์ที่ต้องการเดินเครื่องอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานควรจะมีการระบายความร้อนที่กระบอกสูบกำลังโดยอาจจะใช้ครีระบายความร้อน



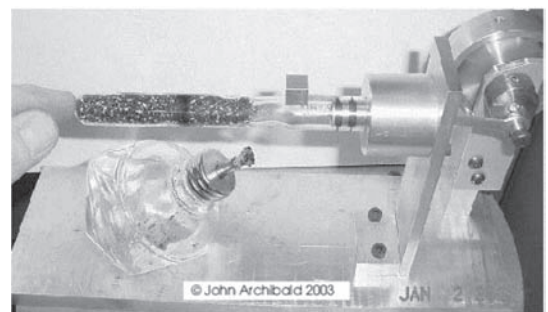
รูปที่ 3 เครื่องยนต์ที่สร้างโดย Ted Walls

รูปที่ 3 แสดงเครื่องยนต์ที่สร้างโดย Ted Walls, สหราชอาณาจักร โครงสร้างทั่วไปทำจากแผ่นอลูมิเนียม ลูกสูบสร้างจากกราฟไฟท์ (Duragraph 11) และ Insert อลูมิเนียม กระบอกสูบสร้างจากทองเหลือง กระบอกสูบโต 20 mm ระยะชัก 18 mm กระบอกสูบร้อนสร้างจากหลอดทดลองขนาด 14 mm ID 140 mm L ล้อช่วยแรงโต 75 mm มีก้าน 3 ซี่ ก้านสูบ ยาว 75 mm ที่ Big

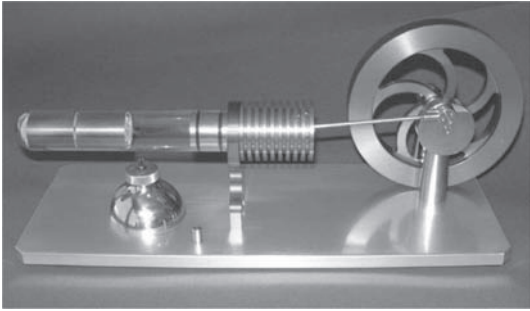
end ใช้ลูกปืนตลับแบบลูกกลม เครื่องยนต์ติดอย่างง่ายตายในการสตาร์ทครั้งแรกโดยใช้เทียนไขเป็นแหล่งความร้อน หลังจากเดินเครื่องครบ 2 ชั่วโมงเครื่องยนต์มีความเร็วรอบ 450 rpm เครื่องยนต์ของ Walls มีปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง 5.655 cc โดยมีปริมาตรของหลอดเลือดประมาณ 20.204 cc หรืออัตราส่วนการอัด $CR = 3.573$ โดยประมาณ การสังเกตพบว่าเครื่องยนต์นี้มีแรงบิดสูงจนน่าประหลาดใจ

รูปที่ 4 แสดงเครื่องยนต์ที่สร้างโดย John Archibald, สหรัฐอเมริกา มิติหลักคือ กระบอกสูบโต 25.4 mm ระยะชัก 12.7 mm รีเจนเนอเรเตอร์เป็นฝอยสเตนเลส ใช้ตะเกียงแอลกอฮอล์เป็นแหล่งความร้อน เครื่องยนต์ของ Archibald มีปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง 6.435 cc โดยมีปริมาตรของหลอดเลือดประมาณ 18.699 cc หรืออัตราส่วนการอัด $CR = 2.906$ เครื่องยนต์ทำงานด้วยความเร็วรอบ 250 rpm

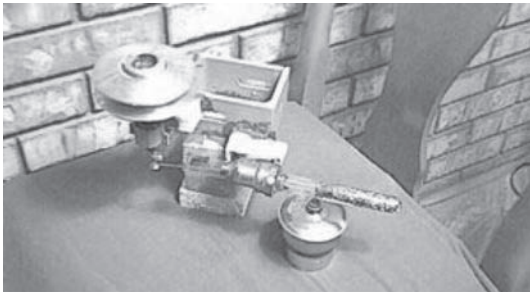
เครื่องยนต์ที่สร้างโดย Harrie IJzendoorn, ฮอลแลนด์ แสดงในรูปที่ 5 ลูกสูบเป็น Anodized aluminium โต 25 mm ระยะชัก 25 mm อยู่ในกระบอกสูบทองเหลืองโดยมี Clearance 0.02 mm หลอดทดลองมีขนาด 25 mm ID ยาว 150 mm ใช้ลูกปืนตลับแบบลูกกลมที่ Big end และเพลาช้อเหวี่ยง เครื่องยนต์ของ IJzendoorn มีปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง 12.272 cc ปริมาตรของหลอดเลือดประมาณ 52.612 cc อัตราส่วนการอัด $CR = 4.287$ มีความเร็วสูงสุด 650 rpm



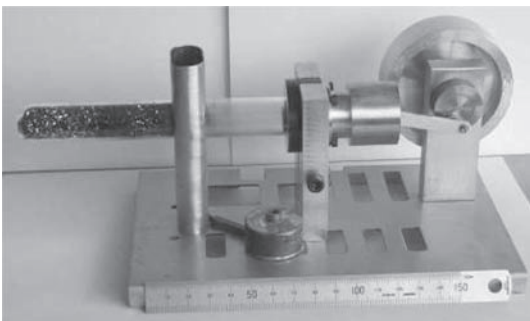
รูปที่ 4 เครื่องยนต์ที่สร้างโดย John Archibald



รูปที่ 5 เครื่องยนต์ที่สร้างโดย Harrie IJzendoorn



รูปที่ 6 เครื่องยนต์ที่สร้างโดย Marvin McEntire



รูปที่ 7 เครื่องยนต์ที่แสดงใน The Groundlevel Home Page

Marvin McEntire ได้สร้างเครื่องยนต์ความร้อนพลังเสียงขึ้น 3 เครื่อง รูปที่ 6 แสดงเครื่องยนต์ของ McEntire เครื่องหนึ่ง แต่เขาไม่ได้ให้รายละเอียดเกี่ยวกับมิติของเครื่องยนต์ไว้เลย

นอกจากนี้ยังค้นพบเครื่องยนต์อีกเครื่องหนึ่งซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 7 ใน Web site นี้ได้บรรยายถึงการสร้างและการแก้ปัญหาที่เครื่องยนต์จะทำงานได้เอาไว้ด้วย

5. สรุป

แม้ว่าเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกนี้จะเป็นข้ออ้างใหม่ และไม่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางมากนัก แต่เครื่องยนต์แบบนี้ก็เป็นที่น่าสนใจ เพราะวากไลของเครื่องยนต์นั้นง่ายมาก และสามารถสร้างขึ้นโดยไม่ต้องใช้เทคโนโลยีในการผลิตสูง เหมาะกับแหล่งความร้อนอุณหภูมิไม่สูงมาก ถ้าใช้พลังงานแสงอาทิตย์ก็จะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

รายละเอียดของเครื่องยนต์ความร้อนพลังเสียงแบบลูกสูบที่กล่าวมาแล้วนี้ เป็นเครื่องยนต์ขนาดเล็กที่วิศวกรแบบจำลอง (Model engineer) สร้างขึ้น ในการสร้างเครื่องยนต์แบบนี้เพื่อศึกษาทางวิศวกรรมความร้อน จะต้องมีความรู้พอสมควร เพื่อที่จะสามารถติดตั้งเครื่องมือวัด ที่จำเป็นสำหรับการทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องยนต์ได้อย่างไรก็ตาม การขยายขนาดของเครื่องยนต์ควรจะพิจารณาโดยใช้หลักการของ Similarity

เอกสารอ้างอิง

1. Robert Seir, A simple lamina flow engine, <http://www.stirlingengines.org.uk/thermo/lamina.html>
<http://www.stirlingengines.org.uk/thermo/lamina2.html>
2. Marvin McEntire, The thermo acoustic engine, http://www.earthtoys.com/emagazine.php?issue_number=03.12.01&article=acoustic
3. Fellows Research Group, Inc. <http://www.io.com/~frg/taceng.htm>
<http://www.io.com/~frg/tac.htm>
4. The Groundlevel Home Page, <http://www.groundlevel.demon.co.uk/index.html>