

การศึกษาเชิงทดลองการทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก Experimental Study of Thermoacoustic Cooling

สว่างทิพย์ ศรีกิจสุวรรณ¹, สุวัฒน์ กุลธนปรีดา², ปุณยศ วัลลิกุล³
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนพิบูลย์สงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800
โทร 0-29132500 โทรสาร 0-25874350 Email: swts@kmitnb.ac.th¹, suwat@kmitnb.ac.th², ppy@kmitnb.ac.th³

Sawangtit Srikitsuwan¹, Suwat Kuntanaprida², Pumyos Vallikul³
Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology, North Bangkok,
1518 Piboonsongkram road, Bangsue, Bangkok 10800
Tel: 0-29132500 Fax: 0-25874350 Email: swts@kmitnb.ac.th¹, suwat@kmitnb.ac.th², ppy@kmitnb.ac.th³

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอผลการศึกษาเชิงทดลองของการทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก (Thermoacoustic) ชุดทดลองที่จัดสร้างขึ้นในงานศึกษานี้ประกอบด้วยสามส่วนหลักคือ ลำโพง ท่อแก้ว และสแตค (stack) โดยปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกเกิดขึ้นจากการสั่นแบบคลื่นนิ่งของของไหลในสแตค ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนอย่างต่อเนื่องระหว่างปลายทั้งสองข้างของสแตค ผลจากการทดลองเบื้องต้นในการศึกษานี้พบว่า ชุดทดลองที่ใช้อากาศเป็นของไหลและใช้สัญญาณเสียงที่มีความถี่ 360 Hz สามารถทำให้ปลายของสแตคทั้งสองด้านมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันถึงประมาณ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งผลจากการศึกษาเบื้องต้นนี้จะถูกใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกต่อไป โดยเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกมีข้อดีที่เป็นอุปกรณ์จำพวก Clean Technology และมีอายุการใช้งานยาวนาน อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกยังต่ำอยู่ จำเป็นจะต้องมีการวิจัยอย่างต่อเนื่องต่อไป

Abstract

This paper presents an experimental study of thermoacoustic cooling. A thermoacoustic cooler constructed in this study consists of three main parts: a loud speaker, a glass tube, and a stack. A thermoacoustic phenomenon appears when there is fluid oscillating as a standing wave in the stack. This

oscillation results continuous heat transfer between two ends of the stack. The experimental results of this study found that the constructed thermoacoustic cooler, which employs air as the working fluid and the oscillating frequency of 360 Hz, can produce the temperature difference between the ends of the stack up to 4 °degree-C. This preliminary result will be used for designing a thermoacoustic refrigerator in future. Advantages of thermoacoustic refrigerators are environmentally clean and long life-time. However, its efficiency is still very low. Further research is needed.

1. บทนำ

ปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกเป็นการเปลี่ยนพลังงานเสียงให้เป็นพลังงานความร้อน หรือเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานเสียง จากปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้สามารถนำไปสร้างเครื่องทำความร้อน/เย็น (heat pump/refrigerator) และเครื่องต้นกำลัง (engine) ได้ โดยเครื่องต้นกำลังในที่นี้หมายถึงเครื่องต้นกำลังที่ทำหน้าที่ทำการสร้างคลื่นเสียง ส่วนเครื่องทำความร้อน/เย็นจะขับเคลื่อนด้วยคลื่นเสียง ซึ่งเครื่องกลแบบเทอร์โมอะคูสติกนี้มีข้อดีคือ มีอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่จำนวนน้อยชิ้นทำให้มีอายุการใช้งานที่นาน และในส่วนของเครื่องทำความเย็นนั้นไม่ต้องใช้สารทำความเย็นที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ในช่วงเวลา 20 ปี ที่ผ่านมา ได้มีการออกแบบอุปกรณ์ทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกและจดสิทธิบัตรมีอยู่หลายลักษณะ [1], [2],

1 นักศึกษาระดับปริญญาเอก

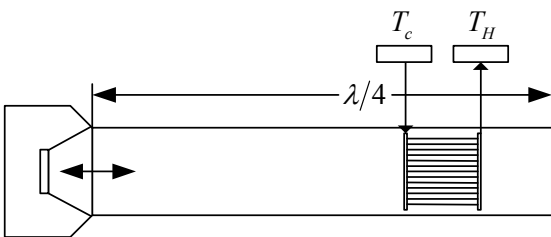
2,3 อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

[3], [4], [5] โดยในแต่ละแบบเน้นในเรื่องข้อดีตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในบางแบบ เช่น [4] จะมีทั้งเครื่องต้นกำลังและเครื่องทำความเย็น ต่อเชื่อมกัน โดยการให้ความร้อนที่เครื่องต้นกำลังเพื่อให้เกิดคลื่นเสียง แล้วใช้คลื่นเสียงไปขับเครื่องทำความเย็น เป็นต้น

ในบทความนี้จะเริ่มต้นด้วยทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นของการทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก จากนั้นอธิบายส่วนประกอบของชุดทดลองที่จัดสร้างขึ้น และสรุปด้วยผลการทดลองที่ได้จากชุดทดลอง

2. การทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก

เครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกโดยทั่วไป ประกอบด้วยท่อที่มีตัวขับ เช่น ลำโพง ติดตั้งอยู่ที่ปลายท่อเพื่อสร้างคลื่นเสียงให้เกิดขึ้นในท่อ ภายในท่อบรรจุด้วยอากาศหรือก๊าซ เช่น ฮีเลียม ไนโตรเจน เป็นต้น ดังแสดงในตามรูปที่ 1 โดยคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นในท่อจะเป็นคลื่นนิ่ง (standing wave) และในท่อจะมีสแตค (stack) วางไว้ภายในตำแหน่งที่เหมาะสม โดยค่าจำกัดความของสแตคจะอธิบายในตอนต่อไป ในกรณีที่ปลายอีกด้านหนึ่งของท่อเป็นปลายปิด ในทางอุดมคติแล้วความยาวท่อที่สั้นที่สุดจะต้องมีค่าเท่ากับ $\lambda/4$ เพื่อให้เกิดคลื่นนิ่งภายในท่อโดยที่ λ คือค่าความยาวคลื่น



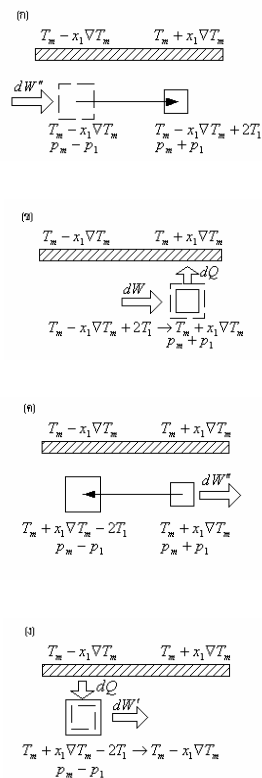
รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก

สแตค (stack) โดยทั่วไปจะทำจากแผ่นบางจำนวนมากประกอบกันเป็นชั้นๆ โดยในทางทฤษฎีแล้ว ควรมีระยะห่างของแต่ละชั้นประมาณ $2\delta_K$ ถึง $4\delta_K$ [6] โดย δ_K คือ thermal penetration depth ที่เกิดจาก thermal conductivity ของของไหลตามแนวตั้งฉากกับสแตค และวัสดุที่ใช้ทำสแตคควรมี thermal conductivity ต่ำ เพื่อความร้อนที่ถ่ายโอนในชั้นขีดผิว (Boundary Layer) ของสแตค ไม่มีการถ่ายเทความร้อนไปทั่วทำให้อุณหภูมิเท่ากันทั้งแผ่นสแตค ซึ่งจะทำได้ไม่สามารถเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกได้

คลื่นนิ่งในสแตคทำให้เกิดอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างปลายทั้งสองของช่วงของสแตค อุณหภูมิที่แตกต่างนี้จะถ่ายเทความร้อนไปยัง heat exchanger ของแต่ละข้างเพื่อนำความร้อนที่ปลายทั้งสองด้านไปใช้ ซึ่งในที่นี้ข้างที่อุณหภูมิต่ำจะถูกใช้ในการทำความเย็น ในขณะที่ข้างที่มีอุณหภูมิสูงจะต้องมีการระบายความร้อนออกอย่างต่อเนื่อง

วัฏจักรการทำงานของของไหลภายใน stack ของเครื่องทำความเย็นสามารถอธิบายได้ด้วยวัฏจักรของ Brayton ดังแสดงในรูปที่ 2 และมีรายละเอียดดังนี้

ในรูปที่ 2(ก) ในจังหวะที่ความดันของคลื่นเสียงเป็นบวก ก่อนมวลของของไหลจะถูกผลักไปทางขวาด้วยคลื่นเสียง ในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ไปปริมาตรของก้อนมวลก็ถูกบีบลงด้วย ทำให้อุณหภูมิภายในสูงขึ้นกว่าที่แผ่น plate เมื่อก้อนมวลเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 2(ข) ความร้อนในก้อนมวลจะถ่ายเทความร้อนไปที่แผ่น plate ทำให้อุณหภูมิที่แผ่น plate ด้านขวาสูงขึ้น ในจังหวะต่อไปเมื่อความดันของคลื่นเสียงเป็นลบ ก้อนมวลจะเคลื่อนที่มาจากซ้าย ถอยกลับยังตำแหน่งเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 2(ค) ซึ่งในจังหวะนี้ปริมาตรของก้อนมวลจะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้อุณหภูมิภายในก้อนมวลต่ำกว่าแผ่น plate ด้านซ้าย จึงเกิดการถ่ายโอนความร้อนจากแผ่น plate เข้ามาเก็บไว้ในก้อนมวลดังแสดงในรูปที่ 2(ง) ครอบรอบการทำงาน



รูปที่ 2 ปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกของก้อนมวลภายในสแตค [6]

จากกระบวนการทั้งสี่ตามที่อธิบายข้างต้น แสดงให้เห็นว่าก้อนมวลทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง เมื่อเกิดกระบวนการแบบต่อเนื่องโดยมีก้อนมวลตัวอื่นมาทำหน้าที่ต่อจากจุดนั้นไปตลอดความยาวของแผ่น plate ทั้งทางด้านซ้าย

และด้านขวา จะทำให้เกิดอุณหภูมิที่แตกต่างกันปลายทั้งสองข้างของสแตก และตั้งที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ถ้าปลายทั้งสองของสแตกติดตั้งด้วย Heat Exchangers จะสามารถนำไปเป็นเครื่องทำความร้อนหรือความเย็นได้

3 ชุดทดลองการทำความเย็นแบบ Thermoacoustics

ชุดทดลองที่จัดสร้างขึ้นในกรศึกษาประกอบด้วยกล่องบรรจุลำโพงขนาด 4" 10W สูง 20 ซม. ที่ต่อกับชุดขยายที่มีแหล่งกำเนิดสัญญาณจาก Function Generator ตัวกล่องอยู่ที่ปลายของท่อแก้วความยาว 55 ซม. และมีจุกยางอุดหลอดแก้วที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3 ในระหว่างท่อแก้วมี stack ที่ทำจากแผ่นบางม้วนเป็นรูปกันหอย แต่ละชั้นถูกสอดด้วยเส้นเอ็นเพื่อให้แต่ละชั้นมีระยะห่างตามที่ต้องการ



(ก)



(ข)

รูป 3 ชุดทดลอง (ก) ภาพถ่ายโดยรวม (ข) แสดงตำแหน่งติดตั้งสแตก



รูปที่ 4 สแตก

ในการทดลองได้ทำการสร้าง stack จากแผ่นพลาสติกใสที่มีระยะห่างเท่ากับ 0.2, 0.8 และ 1.1 มม. และแผ่นอลูมิเนียมบางที่มีระยะห่าง 1.1 มม. และในกรณีของแผ่นพลาสติกใสที่ปลายของ stack ทั้งสองด้านมีแผ่นทองแดงทำหน้าที่ Heat exchanger ติดไว้โดยขดไปพร้อมกับแผ่นพลาสติกใส ดังแสดงในรูปที่ 4 และมีปลายของแผ่นทองแดงอีกประมาณ 15 มม. เพื่อติดกับเทอร์โมคัปเปอรีใช้วัดอุณหภูมิโดยบันทึกเข้าสู่เครื่องบันทึกข้อมูล

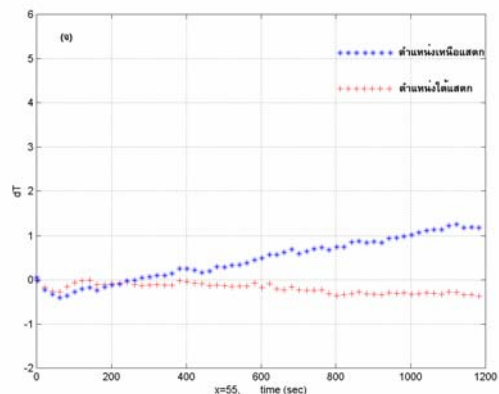
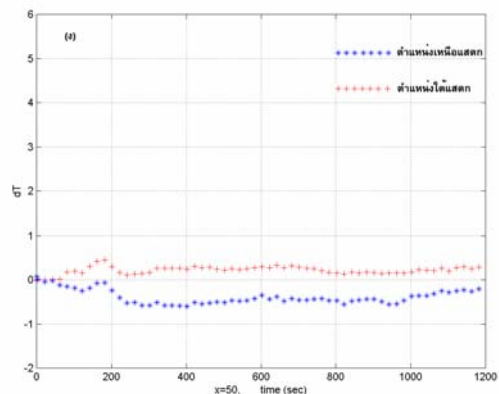
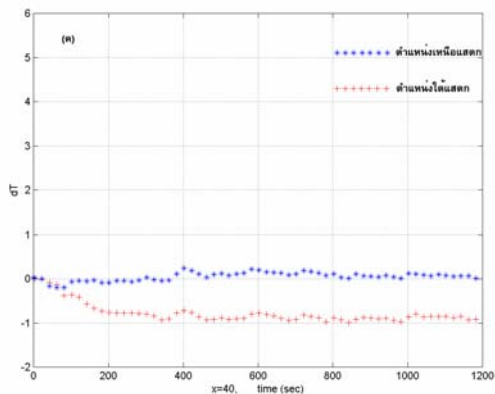
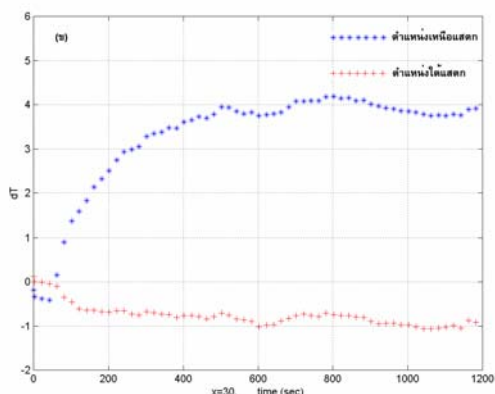
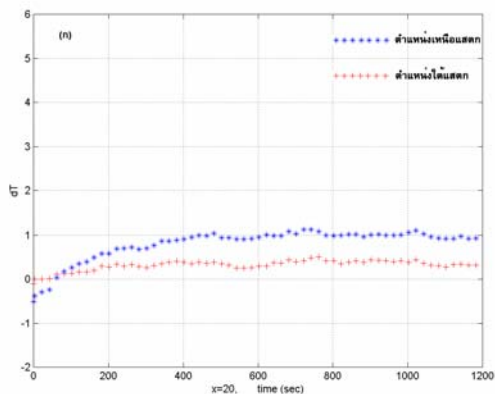
ในการกำหนดความถี่เพื่อทำการทดลอง เนื่องจากขนาดลำโพงใหญ่กว่าท่อแล้ว ดังนั้นในการประกอบกันระหว่างท่อแก้วกับกล่องลำโพงจะมีช่องว่างเกิดขึ้น ทำให้ไม่สามารถคำนวณความถี่เสียงที่ทำให้เกิดคลื่นนิ่งโดยตรงจากค่าความยาวท่อตามสมการเชิงอุดมคติได้ ดังนั้นในการศึกษานี้จะใช้วิธีการทดลองปรับความถี่แทน โดยใช้อากาศเป็นของไหลและจะใช้สัญญาณไซน์ (sine wave) ที่มีกำลัง 2.6 W ป้อนเข้าสู่ลำโพงจาก 100 ถึง 500Hz ซึ่งพบว่าที่ความถี่ 360Hz ทำให้สแตกที่วางไว้ที่ระยะ 30 ซม. จากปลายท่อมีอุณหภูมิแตกต่างสูงสุด ดังนั้นจึงกำหนดความถี่ตลอดการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 360 Hz

4. ผลการทดลอง

ในการหาตำแหน่งที่วางสแตกเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่แตกต่างมากที่สุด โดยทั่วไปจะวางไว้ใกล้กับจุด pressure node การทดลองได้ตั้งค่าความถี่ที่ 360 Hz เป็นความถี่ของชุดทดลอง แล้ววางสแตกให้อยู่ที่ห่างจากปลายปิดด้านบนระยะ 20, 30, 40, 50 ซม.ตามลำดับ มี

thermocouple วัดอุณหภูมิที่ปลายของแผ่นทองแดงยื่นออกมาจากปลายทั้งสองด้านของ stack

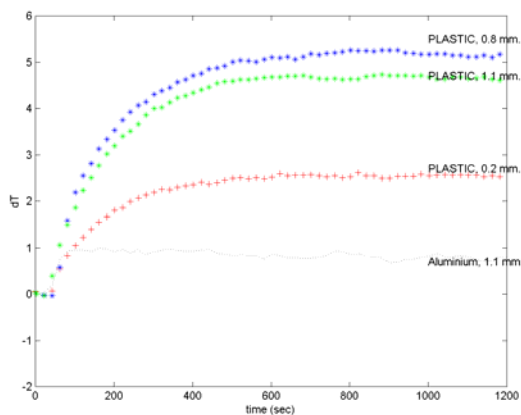
จากรูปที่ 5 อุณหภูมิของปลายทั้งสองด้านของสแตกที่ระยะ 30 ซม. จากปลายท่อมี่ระดับแตกต่างกัน 4°C รูปที่ 5(ข) เป็นตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางสแตก นอกจากนี้จะสังเกตว่าที่ระยะระหว่าง 40-50 ซม. รูปที่ 5(ค)-(ง) อุณหภูมิจะมีทิศทางการกลับทิศจากเดิม ดังนั้นจุดบริเวณนี้เป็น pressure node



รูปที่ 5 อุณหภูมิในแต่ละช่วงของสแตกที่ทำจากพลาสติกที่มีระยะห่างระหว่างแผ่น 0.8 มม.

หลังจากนั้นได้ทำการทดลองเปลี่ยนสแตกที่มีระยะห่างของแผ่นวัสดุที่ทำสแตกและวัสดุที่ใช้ทำสแตกแตกต่างกัน โดยกำหนดตำแหน่งสแตกไว้ที่ระยะ 30 ซม. จากปลายท่อคงที่ตลอดการทดลอง ดังแสดงผลในรูปที่ 6

จากรูปที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบแต่ละสแตก พบว่าสแตกที่ทำจากแผ่นพลาสติกใสซึ่งมีค่า conductivity ต่ำ จะมีอุณหภูมิที่แตกต่างที่ปลายสแตกมากกว่าในกรณีของสแตกที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียมบาง และระยะห่างของสแตกมีผลต่อการอุณหภูมิที่แตกต่างด้วยเช่นกัน



รูปที่ 6 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่แตกต่างที่ปลายสแตกแต่ละแบบ

5. สรุปและงานวิจัยในอนาคต

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเราสามารถนำพลังงานเสียงมาสร้างอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างปลายทั้งสองข้างของสแตก ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทำเครื่องทำความเย็นได้ โดยสแตกต้องทำจากวัสดุที่มีค่า conductivity ต่ำและมีระยะห่างของแต่ละชั้นประมาณ $2\delta_K$ ถึง $4\delta_K$ จากผลการทดลองถึงแม้ระยะห่างของแผ่นจะไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวแต่ก็ใกล้เคียงซึ่งให้ผลที่ดี

ในการศึกษาต่อไปเพื่อพัฒนาให้มีอุณหภูมิแตกต่างกันมากกว่าเดิม โดยจะทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่สามารถบรรจุฮีเลียมหรือไนโตรเจนที่มีความดันสูง รวมทั้งวัดปริมาณความร้อนที่ดึงออกมาเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. J.C. Wheatley, G.W. Swift, and A. Migliori, INTRINSICALLY IRREVERSIBLE HEAT ENGINE, United States Patent, Patent Number 4,489,553, Dec. 1984
2. T.J. Hofler, J.C. Wheatley, and G.W. Swift, ACOUSTIC COOLING ENGINE, United States Patent, Patent Number 4,722,201, Feb. 1988
3. Michael J. Reinke, HEAT EXCHANGER FOR A THERMOACOUSTIC HEAT PUMP, United States Patent, Patent Number 5,339,640, Aug. 1994
4. Thomas J. Hofler, HIGH-EFFICIENCY HEAT-DRIVEN ACOUSTIC COOLING ENGINE WITH NO MOVING PARTS, United States Patent, Patent Number 5,901,556, May 1999
5. Jae-Hee Kim, AUTOMATIC ICE MAKER USING THERMOACOUSTIC REFRIGERATION AND

REFRIGERATOR HAVING THE SAME, United States Patent, Patent Number 6,145,320, Nov. 2000

6. G.W. Swift, "Thermoacoustic engines", J. Acoust. Soc. Am., 84, October 1988.
7. G.W. Swift, Thermoacoustics: a unifying perspective for some engines and refrigerators, <http://www.lanl.gov/thermoacoustics/Book/index.html>.
8. F.W. Schmidt, R.E. Henderson and C.H. Wolgemuth, Introduction to Thermal Sciences, J. Wiley and Sons, 1984.