

การวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเสียงเพื่อจำแนกประเภทรูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะในกระบวนการเชื่อม GMAW ด้วยการใช้หัวตรวจสอบคลื่นเสียงแบบไม่สัมผัสชิ้นงาน

บวรโชค ผู้พัฒนา¹ และ เอกชัย วารินศิริรักษ์²

Abstract

Poopat, B. and Warinsiriruk, E.

Acoustic signal analysis for classification of transfer mode in GMAW by noncontact sensing technique

Songklanakar J. Sci. Technol., 2006, 28(4) : 829-840

The objective in this paper is to investigate acoustic signal emitted during metal transfer in gas metal arc welding process (GMAW). Short circuit, globular transfer and spray transfer were classified by using dynamic microphone. Mode of metal transfer can be clearly classified and explained by using acoustic signal analysis in time domain. Acoustic RMS in time domain can also be used as an indicator to determine modes of metal transfer. The results showed that short-circuit transfer, globular transfer and spray transfer signal exhibited acoustic signal RMS of 79.74×10^{-3} volt, 133.31×10^{-3} volt and 38.73×10^{-3} volt, respectively. In frequency domain analysis, each mode of metal transfer exhibited a certain frequency response range with certain frequencies along the frequency axis. It was found that peak frequency response range short-circuit transfer, globular transfer and spray transfer were 2250 Hz, 5880 Hz and 240 Hz, respectively. The frequency response curve can be clearly be used to classify modes of metal transfer. This non-contact sensing technique was developed as a real time-monitoring technique for rapid control of welding processes.

Key words : metal transfer, GMAW, acoustic signal, noncontact sensing

Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thungkru, Bangmod, Bangkok, 10140 Thailand.

¹Ph.D.(Welding Engineer) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ²นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมการเชื่อม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงทุ่งครุ เขตบางมด กรุงเทพฯ 10140

Corresponding e-mail: bpoopat@yahoo.com, warinsiriruk@yahoo.com

รับต้นฉบับ 29 สิงหาคม 2548 รับลงพิมพ์ 3 กุมภาพันธ์ 2549

บทคัดย่อ

บวรโชค ผู้พัฒนา และ เอกชัย วารินศิริรักษ์

การวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเสียงเพื่อจำแนกประเภทรูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะในกระบวนการเชื่อม GMAW ด้วยการใช้อุปกรณ์ตรวจสอบคลื่นเสียงแบบไม่สัมผัสชิ้นงาน

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2549 28(4) : 829-840

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ทางการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเสียง (acoustic signal) จากการถ่ายโอนน้ำโลหะ (metal transfer) ในกระบวนการเชื่อมแบบ GMAW เพื่อการจำแนกประเภทรูปแบบของการถ่ายโอนแบบลัดวงจร แบบหยดและแบบพ่น ด้วยการใช้อุปกรณ์ไมโครโฟน (dynamic microphone) การถ่ายโอนน้ำโลหะ สามารถแยกแยะและอธิบายกลไกของการถ่ายโอนด้วยสัญญาณเสียงที่เกิดขึ้นจากสัญญาณเสียงในโดเมนเวลาได้อย่างชัดเจน โดยการใช้รากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของคลื่นเสียง (acoustic RMS) เป็นตัวบ่งชี้รูปแบบของการถ่ายโอนน้ำโลหะในโดเมนเวลา ที่สามารถแยกแยะได้จากระดับของรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของคลื่นเสียง (acoustic RMS) ในรูปแบบของการถ่ายโอนแบบลัดวงจร (short-circuit transfer) แบบหยด (globular transfer) และแบบพ่น (spray transfer) ที่มีระดับอยู่ที่ 79.74×10^{-3} โวลต์ 133.31×10^{-3} โวลต์ และ 38.73×10^{-3} โวลต์ ตามลำดับ และสัญญาณเสียงของการถ่ายโอนน้ำโลหะในโดเมนความถี่แสดงความแตกต่างของคุณลักษณะทางเสียงของการเกิดการถ่ายโอนแต่ละรูปแบบได้ทั้งในรูปแบบของสเปกตรัมความถี่และย่านความถี่ตอบสนองสูงสุด ซึ่งย่านความถี่ของการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร แบบหยด และแบบพ่นจะเป็น 2250 Hz 5880 Hz และ 240 Hz ตามลำดับ และการให้ผลทางเส้นโค้งของย่านความถี่ตอบสนอง เพื่อแสดงความแตกต่างของรูปแบบการถ่ายโอนทั้งสามได้ชัดเจน โดยเทคนิคการใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับคลื่นเสียงแบบไม่สัมผัสกับชิ้นงาน (Noncontact sensing) นี้ สามารถนำไปพัฒนาระบบเฝ้าพิทักษ์กระบวนการเชื่อมที่ต้องการ

รูปแบบของการถ่ายโอนน้ำโลหะ (mode of metal transfer) ในการเชื่อมแบบ gas metal arc welding (GMAW) (American Welding Society Vol 1, 2001) เป็นหนึ่งในกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย (fusion welding processes) ที่อาศัยพลังงานจากการอาร์กซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบการถ่ายโอนได้เป็น 3 รูปแบบ (American Welding Society Vol 2, 2001) ที่มีความแตกต่างกันของรูปแบบทางกายภาพ โดยสามารถแบ่งแยกได้เป็น การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร (short-circuit transfer) การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยด (globular transfer) และการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบพ่น (spray transfer) ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรของการเชื่อม เช่น กระแสการเชื่อม อาร์กโวลต์ วัสดุที่ใช้ในการเชื่อม และองค์ประกอบอื่นๆ โดยการควบคุมคุณภาพของการเชื่อมที่ขึ้นกับรูปแบบของการถ่ายโอนน้ำโลหะด้วยนั้นจะไม่เหมาะสมกับการทำนายการเกิดของรูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะจากตัวแปรนำเข้า (manipulated input variables)

ในงานเชื่อมที่มีปริมาณการผลิตที่สูง หรือการเฝ้าสังเกต (monitoring) ตัวแปรของการเชื่อมเพียงตัวใดตัวหนึ่งเพื่อบ่งบอกว่าสถานะของการถ่ายโอนน้ำโลหะ ณ ขณะเวลาการเชื่อมจริงนั้น

ในงานวิจัยที่ผ่านมา นั้น มุ่งเน้นการใช้เทคนิคในการตรวจจับและการทำนายรูปแบบในการถ่ายโอนน้ำโลหะหลายวิธี อาทิ การใช้กล้องความเร็วสูง (high speed camera) ในการศึกษาของ Jones และคณะ (1998) เพื่อวิเคราะห์แรงของสนามแม่เหล็กบนหยดโลหะเหลวจากการเชื่อมจากการปรับเปลี่ยนตัวแปรจากการเชื่อมด้วยการถ่ายภาพความเร็วสูงหรือการเปรียบเทียบผลของภาพถ่ายเพื่อการเปรียบเทียบของการคำนวณเชิงตัวเลข (numerical method) ของ Wang และคณะ (2003) หรือการศึกษาการถ่ายโอนน้ำโลหะจากอิทธิพลของสมบัติทางกายภาพที่เป็นผลจากการตัวแปรในการเชื่อมของ Lancaster (1986) แต่ในงานวิจัยที่ผ่านมาดังกล่าว นั้น ยังมีขีดจำกัดในการประยุกต์ใช้ในการศึกษาเพื่อแยกแยะการถ่ายโอนน้ำโลหะ

ในหลายประการ ทั้งการใช้กล้องความไวสูงที่มีมูลค่าสูงซึ่งยากลำบากในการประยุกต์ใช้งานจริง หรือการใช้การตรวจจับทางไฟฟ้าของ Chu และคณะ (2004) ที่ต้องความถี่ในการสุ่มสัญญาณที่สูงแต่มีราคาสูงตาม หรือการศึกษาผ่านตัวแปรทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองของ Wang และคณะ (2003) แบบในการถ่ายโอนน้ำโลหะที่ขึ้นกับการตั้งสมมติฐานและขอบเขตของระบบ

อย่างไรก็ตาม เทคนิคที่มีการประยุกต์ใช้ในการเฝ้าพิทักษ์ในงานเชื่อมด้วยอาศัยหลักการกำเนิดของคลื่นเสียง (sound waves) ที่ได้จากการเชื่อม ทั้งการใช้เทคนิคคลื่นเสียงในการวิเคราะห์พฤติกรรมกรเกิดแนวเชื่อมในกระบวนการเชื่อม PAW ของ Wang และ Zhao (2001) หรือ Mayer (1987) ที่ใช้การเฝ้าพิทักษ์การเชื่อม SAW ด้วยยอคูลสะตีกอิมมิสชัน ซึ่งในการศึกษาพฤติกรรมกรถ่ายโอนน้ำโลหะใน GMAW ด้วยการใช้เทคนิคการตรวจจับคลื่นเสียงของ Grad และคณะ (2004) ที่เฝ้าพิทักษ์การถ่ายโอนแบบลัดวงจรในการเชื่อม เพื่อตรวจจับความผิดปกติขอแนวเชื่อมที่เกิดจากความผิดปกติขององค์ประกอบในการเชื่อม

แต่ในการศึกษาคุณลักษณะของคลื่นเสียงที่เกิดจากรถ่ายโอนน้ำโลหะทั้ง 3 รูปแบบดังกล่าวข้างต้นในกระบวนการ

GMAW ด้วยเทคนิคการตรวจจับคลื่นเสียง เพื่อแยกแยะรูปแบบการถ่ายโอนด้วยการจัดเก็บข้อมูล ณ เวลาการเชื่อมจริง ที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนทั้งโดเมนเวลาและโดเมนความถี่นั้นยังถือว่ามีความน้อยและยังไม่ชัดเจน ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเสียง เพื่อแยกแยะรูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะในกระบวนการเชื่อม GMAW ด้วยการใช้หัวตรวจสอบแบบไม่สัมผัสชิ้นงาน (Noncontact sensor) เพื่อหลีกเลี่ยงการสัญญาณรบกวนจากการสั่นสะเทือนและสภาวะแวดล้อมที่มีผลในการตรวจจับระยะใกล้ โดยมุ่งเน้นการตรวจจับสัญญาณคลื่นเสียงจากการเชื่อม ณ ขณะเวลาการเชื่อมจริงเพื่อนำมาวิเคราะห์สัญญาณสำหรับเป็นพื้นฐานในการควบคุมคุณภาพแนวเชื่อม ที่ขึ้นกับรูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะในการควบคุมแบบอัตโนมัติ

วิธีการทดลอง

หลักการในการปรับตั้งการทดลองเพื่อการตรวจจับคลื่นเสียงที่ได้จากการถ่ายโอนน้ำโลหะในกระบวนการเชื่อม GMAW นั้นแสดงดัง Figure 1 ซึ่งการควบคุมพิทักษ์ในการเดินแนวเชื่อมจะใช้ FANUC Robot SERIES R-

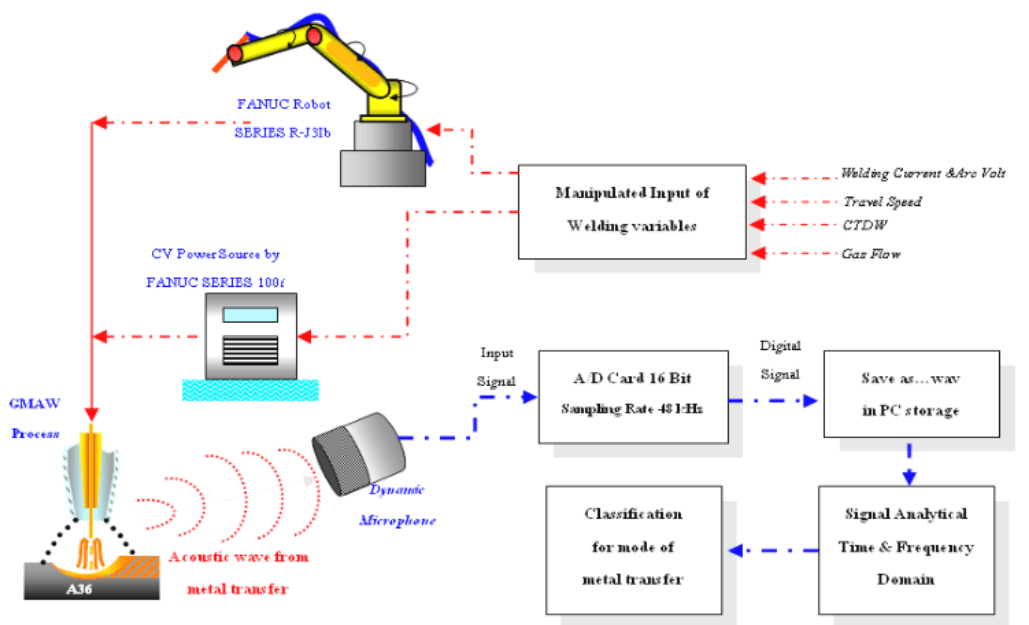


Figure 1. Experimental apparatus of acoustic detection for metal transfer classification

J3Ib และการป้อนโปรแกรมตัวแปรให้กับเครื่องเชื่อมด้วย FANUC SERIES 100i ตัวแปรในการเชื่อมที่มีการกำหนดให้คงที่นั้น ประกอบด้วย ลวดตัวนำชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มม. เชื่อมบนเหล็กกล้าแผ่นขนาด 38 x 280 x 9 มม. ที่มีการทำความสะอาดพื้นผิวแล้ว ในส่วนของตัวแปรนำเข้าที่มีการปรับเปลี่ยนเพื่อบังคับให้เกิดการถ่ายโอนน้ำโลหะทั้ง 3 รูปแบบนั้น แสดงใน Table 1 โดยผลของแนวเชื่อมหลังการเชื่อมตามสภาวะดังกล่าวแสดงใน Figure 2 การตรวจจับคลื่นเสียงจากการถ่ายโอนน้ำโลหะ อาศัยไดนามิคไมโครโฟน (dynamic microphone) Philips SBC MD650 เป็นทรานซิวเซอร์ในการตรวจจับคลื่นเสียงโดยรักษาระยะการตรวจจับที่ 200 มม. จากปลายลวดตัวนำ แล้วทำการเปลี่ยนสัญญาณคลื่นเสียงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เพื่อถ่ายโอนเข้าสู่ระบบการเปลี่ยนสัญญาณจากอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D converter) ด้วยอัตราการสุ่ม 48 kHz เพื่อนำสัญญาณดิจิทัลเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณที่ทำการจัดเก็บ ณ เวลาการเชื่อมจริงจะจัดเก็บใน

รูปแบบของโดเมนเวลา (Time domain) โดยในขั้นตอนการวิเคราะห์จะอาศัยสารสนเทศของสัญญาณเสียงที่ผ่านการลดขนาดสัญญาณรบกวนด้วยระดับ 0.168 โวลต์แล้ว แล้วจึงทำการวิเคราะห์ทั้งทางโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ เพื่อความชัดเจนในการแยกแยะรูปแบบในการถ่ายโอนน้ำโลหะ เนื่องจากสัญญาณเสียงที่ตรวจจับมานั้นมีคุณลักษณะของการเป็นกลุ่มสัญญาณของอนุกรมฟูเรียร์ จึงมีความจำเป็นทางการวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณเสียง เพื่อการจำแนกประเภทรูปแบบของการถ่ายโอนน้ำโลหะด้วย ซึ่งวิธีการในการแปลงสัญญาณสู่โดเมนความถี่นั้น อาศัยการหลักการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) โดยอัลกอริทึมในการโปรแกรมการแปลงโดเมน (Etter, 1993) ตามสมการ (1)

$$F(k) = FFT \{f(n)\} \quad (1)$$

เมื่อ $F(k)$ เป็นสัญญาณที่แปลงสู่โดเมนความถี่แล้ว ด้วยการคำนวณสัญญาณ $f(n)$ ที่เป็นสัญญาณเสียงในโดเมน

Table1. Welding conditions setup for three modes of metal transfer

Mode of metal transfer	Welding current (Amp)	Arc volt (Volt)	Contact tube-to-work - distance: CTWD (mm)	Gas-shielding @ 17 liter per min
Short-circuiting	150	21.5	15	85%Ar + 15%CO ₂
Globular	230	25.5	20	85%Ar + 15%CO ₂
Spray	290	32	20	85%Ar + 15%CO ₂

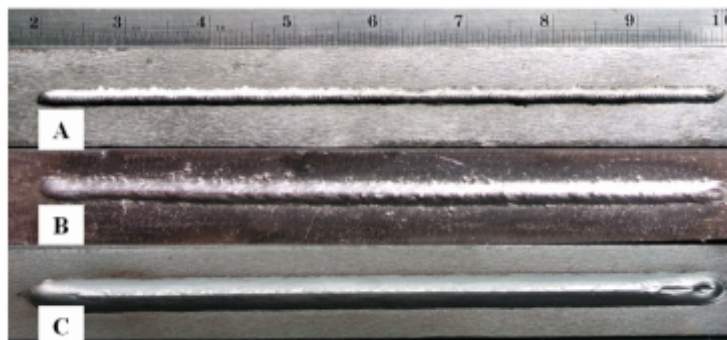


Figure 2. Weld bead resulting from each welding condition in Table 1 (A) Short-circuit transfer (B) Globular transfer and (C) Spray transfer.

เวลา ซึ่งใช้จำนวนสัญญาณ 400 จุดในการแปลงโดเมนของสัญญาณเสียงที่เป็นสัญญาณพัลส์จากสัญญาณเสียงของการถ่ายโอนน้ำโลหะมาทำการแปลงโดเมน

ผลการทดลองและวิจารณ์

สัญญาณเสียงในรูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร
 สัญญาณเสียงจากการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจรในโดเมนเวลา ดังแสดงใน Figure 3 เป็นการแสดงการถ่ายโอนน้ำโลหะที่ครบวัฏจักรของการถ่ายโอนแบบลัดวงจร โดยจะประกอบด้วยสัญญาณเสียงที่เกิดจากการอาร์ก (arcing period) สัญญาณเสียงจากการสัมผัส (dripping echo) และสัญญาณของการตัดขาดจากแรงบีบรัด (pinch-off echo) พบว่าระดับความดังของแอมพลิจูด (amplitude) ในช่วงของการอาร์กนี้ จะมีระดับที่ค่าเฉลี่ย 0.0036 โวลต์ซึ่งเป็นผลจากการลดขนาดสัญญาณรบกวนออกไป (de-noising) จึงทำให้ผลของสัดส่วนระหว่างสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR) นั้นมีค่าที่สูงเป็นผลให้มีความสามารถในการนำสัญญาณมาวิเคราะห์ได้ และผลของสัญญาณเสียงจากการทดลองนี้มีความคล้ายคลึงกับผลการทดลองของ Grad และคณะ (2004) ที่มีการแสดงความสัมพันธ์ทางผลของสัญญาณเสียงกับสัญญาณทางไฟฟ้า เพื่อพิสูจน์ว่าสัญญาณเสียงที่ปรากฏนั้นเป็นสัญญาณเสียงที่มาจากถ่ายโอนน้ำโลหะจริง เนื่องจากระยะเวลาของช่วงเวลาของการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 3.8 มิลลิวินาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ

ช่วงเวลาของการลัดวงจรของ Grad และคณะ (2004) ที่ช่วงเวลา 3.2 วินาที โดยได้จากสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งของค่าความต่างจากของช่วงเวลาการลัดวงจรนั้น เป็นผลจากการใช้พารามิเตอร์ของการเชื่อมที่ต่างระดับกัน ดังนั้นสัญญาณเสียงที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้จะถือได้ว่าเป็นสัญญาณเสียงที่ได้จากกลไกการถ่ายโอนน้ำโลหะซึ่งทำให้ช่วยลดความจำเป็นในการตรวจจับสัญญาณทางไฟฟ้าที่ต้องใช้อัตราการสุ่มที่สูงออกไป

ความสัมพันธ์ระหว่างกลไกในการถ่ายโอนน้ำโลหะกับสัญญาณเสียงที่เกิดขึ้นในสถานะการเชื่อมที่เป็นการถ่ายโอนแบบลัดวงจร ดังแสดงใน Figure 4 เนื่องจากสถานะการเชื่อมที่สร้างความร้อนอยู่ในช่วงที่ต่ำ จึงทำให้อัตราการป้อนลวดมีค่ามากกว่าอัตราการหลอมละลายของลวดป้อนเดิม มีผลให้ลวดพุ่งชน (สัมผัส) กับผิวหน้าชิ้นงานจนเกิดเป็นสัญญาณเสียงที่เป็นสัญญาณเสียงจากการสัมผัส (สัญลักษณ์ **b** ใน Figure 4) ขึ้น และขนาดสัญญาณจะลดลงเนื่องจากอาร์กเกิดการดับ (ลัดวงจร) ลงชั่วขณะ (short-circuit period) ซึ่งมีช่วงเวลาประมาณ 5 มิลลิวินาที ซึ่งระยะเวลานี้จะขึ้นกับขนาดของการเหนี่ยวนำ (inductance) ที่จะควบคุมปริมาณของกระแสที่เพิ่มขึ้นให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมจนอุณหภูมิของปลายสูงขึ้น กระแสมีค่าสูงขึ้นด้วย จนมีสถานะที่แรงบีบรัด (pinch force) สามารถตัดขาดได้ ซึ่งเป็นที่มาของสัญญาณเสียงที่เรียกว่า Pinch-off Echo (สัญลักษณ์ **c** ใน Figure 4) ซึ่งมีระดับแอมพลิจูดของการเกิดที่ประมาณ 1 โวลต์ สาเหตุของการมีระดับแอมพลิจูดที่สูงนั้น เนื่องจากเกิดการสั่นสะเทือนใน

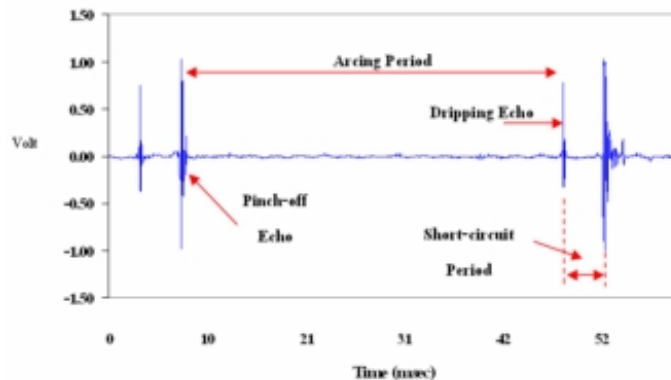


Figure 3. Acoustic signals in time domain of short-circuit transfer condition.

ระดับรุนแรงจากการตัดขาดของลวดตัวนำ จากนั้นการอาร์กจะเกิดขึ้นใหม่ (reigniting) อีกครั้ง และจะเกิดเป็นวัฏจักรดังกล่าวตลอดการเชื่อมแบบลัดวงจร ที่ให้คาบเวลาของการถ่ายโอนอยู่ในช่วง 40 มิลลิวินาที (25 หยต/วินาที)

สัญญาณเสียงในรูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยด สัญญาณเสียงจากการถ่ายโอนแบบหยดในรูปของโดเมนเวลานั้น (Figure 5) จะมีลักษณะการเกิดของสัญญาณเสียงที่แตกต่างกันจากการถ่ายโอนแบบลัดวงจร

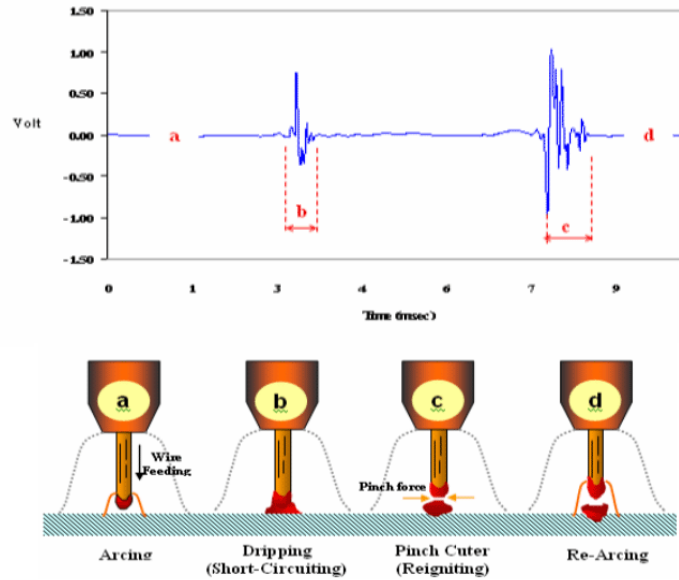


Figure 4. Comparison between acoustic signal of short-circuit transfer and its schematic transfer mechanism.

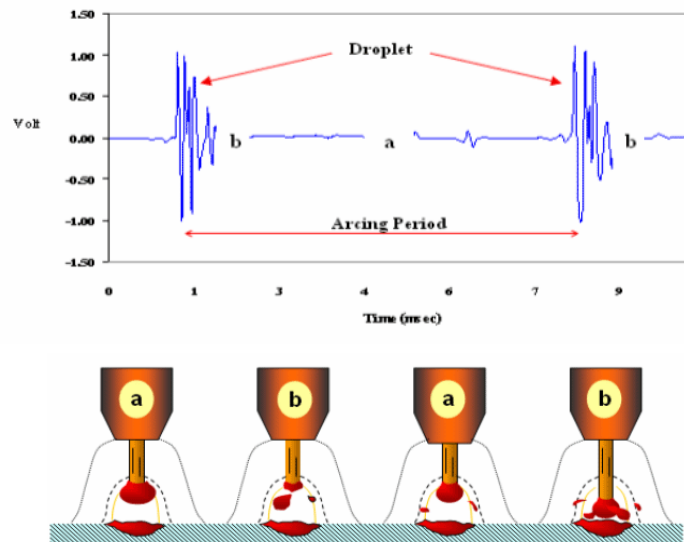


Figure 5. Comparison between acoustic signal of globular transfer and its schematic transfer mechanism.

เนื่องจากการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดนั้น จะมีปัจจัยของการเกิดการถ่ายโอนแบบนี้จากการใช้ตัวแปรในการเชื่อมที่สามารถสร้างปริมาณความร้อนที่สูงกว่าแบบลัดวงจร ทำให้โลหะบนปลายลวดตัวนั้นมีรูปร่างเป็นหยดโลหะเหลวที่มีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางลวดตัวนำ และอาศัยแรงโน้มถ่วงดึงดูดให้หยดโลหะเหลวถ่ายเทลงสู่ท่อหลอมละลาย ซึ่งในส่วนใหญ่จะไม่ปรากฏสัญญาณเสียงที่เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างปลายอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงาน แต่จะมีสัญญาณเสียงจากการตัดขาดแล้วหยดลงสู่ท่อหลอม (drop detachments) ซึ่งมีพัลส์ของสัญญาณเสียงที่คล้ายคลึงกับการตัดขาดในแบบลัดวงจร โดยมีระดับแอมพลิจูดสูงสุดที่ประมาณ 1 โวลต์ เพราะการเกิดแรงบีบอัดจากสนามแม่เหล็กที่สูงกว่าการถ่ายโอนแบบลัดวงจร จึงทำให้ปัจจัยในการถ่ายโอนนั้นอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าแบบลัดวงจร ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนน้ำโลหะอย่างรวดเร็วก่อนที่ปลายอิเล็กโทรดจะพุ่งชนผิวหน้าชิ้นงาน และพบว่าคาบเวลาของการถ่ายโอนตามสภาวะการเชื่อมนี้ จะมีคาบเวลาที่สั้นกว่า (ประมาณ 9 มิลลิวินาที) การถ่ายโอนแบบลัดวงจรโดยให้อัตราของการถ่ายโอนอยู่ในช่วง 110 หยด/วินาที ซึ่งมีความสอดคล้องทางการอัตราการถ่ายโอนน้ำโลหะ ดัง Figure 2 (B) ที่มีขนาดแนวเชื่อมที่ใหญ่กว่าการถ่ายโอนแบบลัดวงจร (Figure 2 (A))

สัญญาณเสียงในรูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบพ่น

สัญญาณเสียงจากการเชื่อมในสภาวะที่เกิดการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบพ่น (ตามสภาวะการเชื่อมตาม Table 1) จะมีรูปแบบสัญญาณตามเวลาของการเกิดในลักษณะที่มีคาบการเกิดของสัญญาณเสียงที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีระดับของแอมพลิจูดที่ราบเรียบกว่าการถ่ายโอนแบบลัดวงจร และแบบหยด เพราะเป็นผลจากการที่ใช้กระแสและแรงดันของการเชื่อมที่มีปริมาณสูงนั้น ทำให้เกิดความร้อนของพลาสมาและความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กที่ปลายของลวดตัวนำมีปริมาณที่สูงมากส่งผลให้ปลายลวดตัวนำนั้นเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งสู่ของเหลวอย่างรวดเร็วและผลจากแรงบีบอัดในปริมาณที่สูง ทำให้เกิดการบีบอัดปลายของลวดตัวนำที่มีสถานะในเชิงโลหะเหลว มีรูปร่างที่คล้ายปลายดินสอ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำ (จากการค้นคว้าของ Wang

และคณะ (2003)) และถ่ายโอนลงสู่ท่อหลอมละลายด้วยขนาดของหยดโลหะที่มีขนาดเล็กที่มีความเร็วในการถ่ายโอนที่สูง จึงทำให้คุณลักษณะของการถ่ายโอนแบบนี้ที่มีอัตราการถ่ายโอนน้ำโลหะในปริมาณสูง ลักษณะของแนวเชื่อมจากการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบพ่น จะให้แนวเชื่อมที่มีผิวเรียบซึ่งเกิดจากน้ำโลหะมีหยดขนาดเล็ก และมีสะเก็ดน้ำโลหะ (spatter) น้อยมาก ดังแสดงในรูป Figure 2C Figure 6 แสดงให้เห็นถึงสัญญาณเสียงที่มีการตัดขาดน้ำโลหะอย่างรวดเร็ว โดยมีวัฏจักรที่มีคาบเวลาการเกิดที่สั้นกว่าการถ่ายโอนแบบลัดวงจรและแบบหยดมาก ซึ่งระดับของสัญญาณเสียงสูงสุดของการถ่ายโอนแบบนี้จะมีระดับที่ต่ำกว่า (± 0.088 โวลต์) แอมพลิจูดที่ได้จากสัญญาณเสียงที่ได้จากการถ่ายโอนแบบนี้

คุณลักษณะทางคลื่นเสียงจากการถ่ายโอนน้ำโลหะเพื่อการแยกแยะรูปแบบของการถ่ายโอนน้ำโลหะ

จากการวิเคราะห์รูปแบบของคลื่นเสียงในโดเมนเวลานั้น พบว่าลักษณะการเกิดของสัญญาณเสียงในแต่ละรูปแบบของการถ่ายโอนน้ำโลหะมีความแตกต่างอย่างชัดเจน จึงทำการแปลงสัญญาณเสียงที่เกิดตามเวลา ให้อยู่ในรูปแบบคุณลักษณะที่เรียกว่า รากที่สองมัธยิมกำลังสองของคลื่นเสียง (acoustic RMS) เพื่อให้สามารถทำการชี้แจงสัญญาณเสียงที่เกิดขึ้นได้ว่า มีรูปแบบการถ่ายโอนในแบบใด ซึ่งการแปลงสัญญาณเสียงให้อยู่ในรูปแบบ Root Mean Square: RMS จะว่าตามสมการ

$$Acoustic...RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N (x_i)^2 \right)} \quad (2)$$

โดยที่ใช้สัญญาณ x_i เป็นจำนวน $N=4,800$ จุดตามเวลาของสัญญาณที่เกิด มาเป็นคาบเวลาในการคำนวณ โดยผลของการแปลงสัญญาณเสียงทั้งสามรูปแบบแสดงใน Figure 7 ซึ่งประกอบด้วยผลของค่ารากที่สองมัธยิมกำลังสองของคลื่นเสียง (acoustic RMS) ทั้งสามรูปแบบ ด้วยการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่ารากที่สองมัธยิมกำลังสองของคลื่นเสียงที่จำนวน 20 จุด (10 วินาที) และได้มีการคำนวณค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนจากสิ่งตัวอย่างจำนวน 10 ชิ้น โดยจะพบว่า การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบพ่นนั้นจะมีระดับของรากที่สองมัธยิมกำลังสองของคลื่นเสียง (acous-

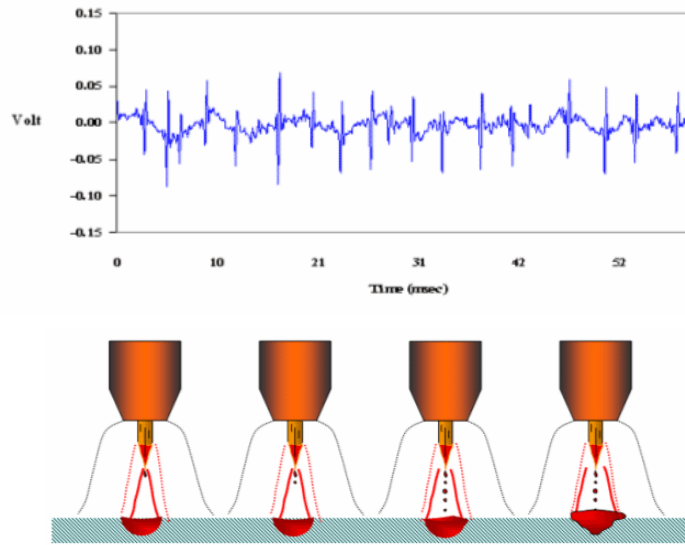


Figure 6. Comparison between acoustic signal of spray transfer and its schematic spray transfer mechanism.

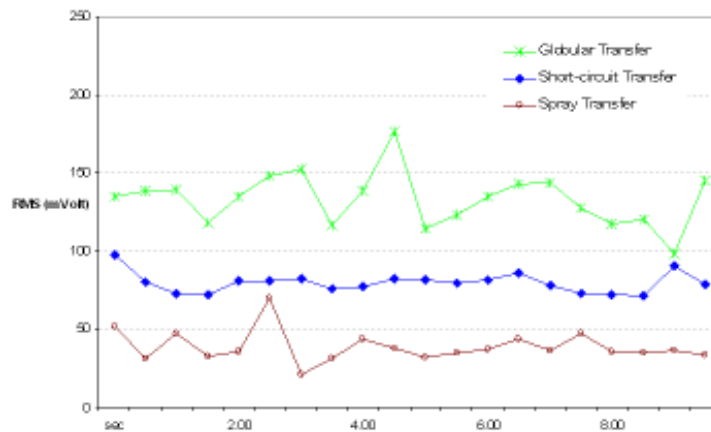


Figure 7. Comparison of 3 modes of metal transfer by using acoustic RMS

tic RMS) ที่ต่ำสุด (ค่าเฉลี่ย 38.73×10^{-3} โวลต์, ค่าการเบี่ยงเบน $\pm 10.09 \times 10^{-3}$ โวลต์) แต่มีความสม่ำเสมอมากที่สุดเมื่อเปรียบที่กับการถ่ายโอนแบบลัดวงจร (ค่าเฉลี่ย 79.74×10^{-3} โวลต์, ค่าเบี่ยงเบน $\pm 6.50 \times 10^{-3}$ โวลต์) และการถ่ายโอนแบบหยุด (ค่าเฉลี่ย 133.31×10^{-3} โวลต์, ค่าเบี่ยงเบน $\pm 16.94 \times 10^{-3}$ โวลต์) เนื่องจากว่าพฤติกรรมของการถ่ายโอนแบบพ่นนั้น จะมีความรบกวนของคลื่นเสียงจากการถ่ายโอน ตามที่กล่าวในการวิเคราะห์รูปแบบของสัญญาณในรูปแบบนี้ ผลของรากที่สองมีผลกำลัง

สองของคลื่นเสียงของการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร มีค่าอยู่ในระดับต่ำกว่าการถ่ายโอนแบบหยุดนั้น เนื่องจากกลุ่มของสัญญาณเสียงของการถ่ายโอนแบบลัดวงจรนั้นมีสัญญาณที่เกิดในระดับที่สูงที่หนาแน่นน้อยกว่าการถ่ายโอนแบบหยุด (ในจำนวนจุดการคำนวณที่เท่ากัน) เพราะการถ่ายโอนแบบลัดวงจรนั้นมีอัตราการถ่ายโอน (หยุด/วินาที) น้อยกว่าการถ่ายโอนแบบหยุดที่มีการถ่ายโอนที่มากกว่า และเนื่องจากพารามิเตอร์ของการเชื่อมที่ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนแบบหยุดนั้น อยู่ในช่วงที่จะมีการเปลี่ยน

อัตราของการถ่ายโอนน้ำโลหะ จากจำนวนหยดที่น้อยไป เป็นจำนวนหยดที่มากขึ้นในหนึ่งหน่วยเวลา เพียงการเพิ่ม กระแสในช่วงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งจากการถ่ายโอนแบบหนึ่ง ไปเป็นอีกแบบหนึ่งจะเรียกพฤติกรรมของกระแสเชื่อมที่ ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของอัตราถ่ายโอนน้ำโลหะนี้ว่า "Transition Current" จึงทำให้ระดับของรากที่สองมีขมึ้ม กำลังสองของคลื่นเสียงของการถ่ายโอนแบบหยดนั้นมีความผันแปรของกลุ่มมากกว่าการถ่ายโอนแบบอื่นๆ

สัญญาณเสียงของรูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะในโดเมน ความถี่

ในการเปรียบเทียบสัญญาณเสียงที่ถูกคำนวณ ให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ตามสมการ (1) นั้น สามารถที่จะแยกแยะสัญญาณเสียงของการถ่ายโอนน้ำโลหะในแต่ละรูปแบบได้ ดังแสดงใน Figure 8 ที่แสดงสเปกตรัมของการถ่ายโอนน้ำโลหะทั้ง 3 รูปแบบ ซึ่งในแต่ละสเปกตรัมจะได้ออกจากการเฉลี่ยของสัญญาณในแต่ละรูปแบบการถ่ายโอนที่

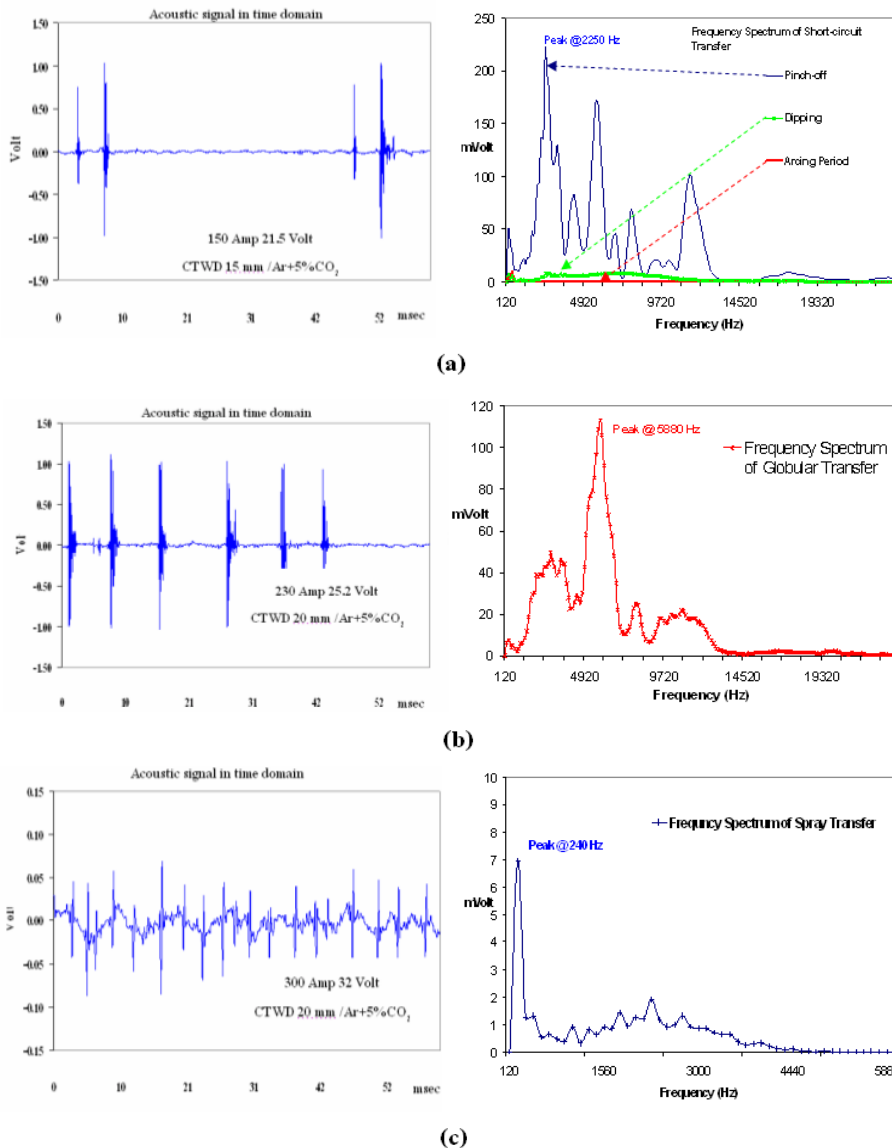


Figure 8. Acoustic signal in time domain and frequency domain of (a) short-circuit transfer (b) globular transfer and (c) spray transfer.

จำนวน 10 สิ่งตัวอย่าง โดยสเปกตรัมความถี่ของการอาร์ก ระหว่างลวดตัวนำกับชิ้นงานนั้น จะมีค่าแอมพลิจูดสูงสุดอยู่ที่ย่านความถี่ที่ 480 Hz ในระดับ 3.483 มิลลิโวลต์ และสเปกตรัมของการเกิดการสัมผัส (ชน) กันของปลายลวดตัวนำกับผิวชิ้นงานนั้นจะมีรูปทรงที่เป็นแถบกว้างในย่านความถี่จาก 1520 Hz ถึง 15000 Hz ซึ่งมีแอมพลิจูดในระดับที่สูงที่สุดที่ 7200 Hz ในระดับ 7.851 มิลลิโวลต์ และสัญญาณเสียงในโดเมนความถี่ที่เกิดจากการตัดขาดของปลายลวดจากแรงบีบรัด (pinch-off) นั้นมีระดับความรุนแรงของการเกิดที่มากกว่าสัญญาณทั้งสองที่กล่าวมาอย่างชัดเจนโดยจะมีค่าแอมพลิจูดสูงสุดที่ย่านความถี่ที่ 2250 Hz ในระดับ 220.634 มิลลิโวลต์ ซึ่งความสัมพันธ์ของ Figure 8 (a) ซึ่งแสดงถึงโดเมนทางเวลา และโดเมนความถี่ของสัญญาณจากการถ่ายโอนแบบลัดวงจร แสดงดังสเปกตรัมความถี่ดัง Figure 8 (b) ซึ่งแสดงถึงโดเมนทางเวลาและโดเมนความถี่ของการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดนั้น จะพบว่า มีระดับแอมพลิจูดของสัญญาณที่สูงที่สุดที่ 5880 Hz ในระดับ 112.698 มิลลิโวลต์ โดยพบว่า ย่านความถี่ของการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดนั้นมีย่านความถี่ที่คล้ายคลึงกันกับการถ่ายโอนแบบลัดวงจร ซึ่งย่านความถี่สูงสุดของการถ่ายโอนแบบหยดนี้จะเป็นย่านความถี่ของฮาร์โมนิคอันดับสองของการถ่ายโอนแบบลัดวงจร เนื่องจากการมีลักษณะทางกายภาพของการตัดคล้ายคลึงกัน แต่กลไกในการตัดที่แตกต่างกัน ซึ่งผลของความคล้ายคลึงกันทางย่านความถี่ของการถ่ายโอนทั้งสองรูปแบบที่กล่าวมานั้น สามารถอธิบายได้จากสมมติฐานที่เกิดจากกลไกทางกายภาพของการถ่ายโอนน้ำโลหะในแต่ละรูปแบบ ซึ่งการถ่ายโอนแบบลัดวงจรนั้นเกิดจากการบีบรัดของแรงที่เกิดจากกระแสที่ได้จากการลัดวงจร (ในสภาวะที่อาร์กดับ) แล้วเกิดการตัดของกันระหว่างลวดตัวนำที่ยังคงสภาวะที่ยังไม่มีถ่ายโอนกับน้ำโลหะที่สัมผัสกับผิวชิ้นงาน แต่การถ่ายโอนแบบหยดนั้นมีพลังงานความร้อนที่สูงกว่าการถ่ายโอนแบบลัดวงจร และมีแรงจากการบีบรัดที่สูงกว่าจึงทำให้การถ่ายโอนลงสู่บ่อหลอมละลายนั้น เกิดก่อนการสัมผัสระหว่างปลายลวดตัวนำกับผิวงาน ดังนั้นลักษณะของการถ่ายโอนที่มีกลไกที่แตกต่างกันนี้ เป็นผลให้ย่านความถี่เกิดแอมพลิจูดสูงสุดนั้นเกิดที่ความถี่ที่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากคุณลักษณะของสเปกตรัมที่มี

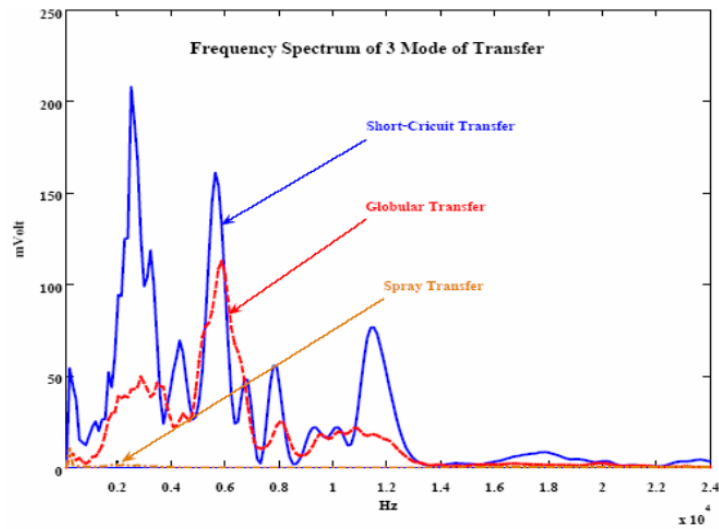
ความคล้ายคลึงกันนั้น เกิดจากขาดของลวดตัวนำกับโลหะจากแรงบีบรัดที่ทำให้ลวดตัวนำขาดออกจากกัน จึงเป็นผลให้ความถี่ของเสียงที่เกิดขึ้นนั้นมีย่านความถี่เกิดขึ้นนั้นอยู่ในย่านที่ใกล้เคียงกัน

ในส่วนสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณเสียงจากการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบพ่น โดยจะมีความถี่ที่แสดงระดับแอมพลิจูดที่โดดเด่นที่ 240 Hz ที่ระดับ 6.933 มิลลิโวลต์ ใน Figure 8 (c) อีกทั้งมีระดับแอมพลิจูดที่อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าการถ่ายโอนอีกสองแบบ ซึ่งเป็นผลจากการถ่ายโอนน้ำโลหะที่ลักษณะหยดโลหะเหลวที่มีขนาดเล็กเกิดสัญญาณเสียงที่มีระดับต่ำและราบเรียบ อีกการเปรียบเทียบผลของการแปลงโดเมนของสัญญาณเสียงเพื่อแสดงความแตกต่างเพื่อการแยกแยะระดับของสัญญาณเสียงในโดเมนความถี่ในรูปของสเปกตรัมนั้น แสดงใน Figure 9 (a) และผลทางการเปรียบเทียบย่านความถี่ตอบสนองในหน่วยเดซิเบลของทั้ง 3 รูปแบบของการถ่ายโอนน้ำโลหะนั้น เพื่อแสดงผลทางความแตกต่างอย่างชัดเจนนั้น จะพบว่าเส้นโค้งของความถี่ตอบสนองของการถ่ายโอนแบบลัดวงจรและแบบหยดนั้นจะมีความคล้ายคลึงกันทางมีระดับเดซิเบลที่ย่านความถี่ที่ 1-10 kHz แต่จะแสดงย่านความถี่สูงสุดที่แตกต่างกันเนื่องจากการมีสถานการณ์ตัดขาด (pinch-off) ที่แตกต่างกันและมีระดับทางเดซิเบลที่แตกต่างกันด้วย ในส่วนย่านความถี่ตอบสนองของการถ่ายโอนแบบพ่นนั้นจะอยู่ในย่านความถี่ที่ 0.1-1 kHz โดยมีระดับของเดซิเบลที่ต่ำกว่าการถ่ายโอนแบบอื่นด้วย ดังแสดงใน Figure 9 (b)

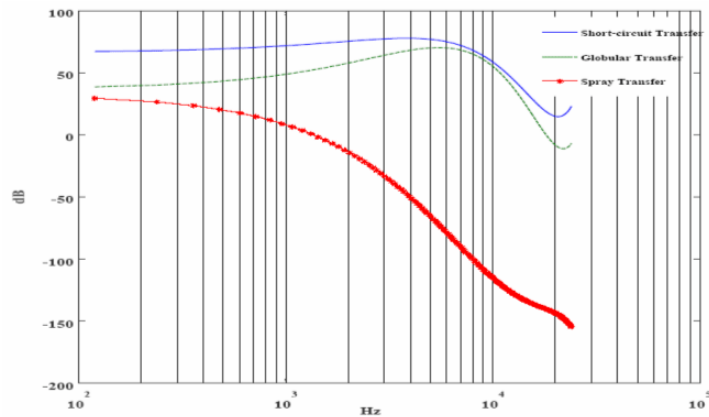
สรุปผลการทดลอง

การวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเสียงจากการถ่ายโอนน้ำโลหะในกระบวนการเชื่อมแบบ GMAW เพื่อการแยกแยะรูปแบบของการถ่ายโอนแบบลัดวงจร, แบบหยดและแบบพ่น ด้วยการใช้ไดนามิคไมโครโฟนการถ่ายโอนน้ำโลหะสามารถแยกแยะและอธิบายกลไกของการถ่ายโอนด้วยสัญญาณเสียงที่เกิดขึ้นจากสัญญาณเสียงในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ได้อย่างชัดเจน ซึ่งผลของคุณลักษณะทางคลื่นเสียงที่เกิดจากการถ่ายโอนแต่ละรูปแบบนั้น แสดงใน Table 2

การวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเสียงเพื่อแยกแยะรูปแบบ



(a)



(b)

Figure 9. Comparisons of 3 modes transfer by frequency spectrum in (a) mVolt axis and (b) decibel (dB) axis.

Table 2. Summary of relationship between acoustic signal analysis and modes of metal transfer

Mode of metal transfer	Welding current (Amp)	Arc volt (Volt)	Wire feed speed (mm/sec)	Transfer rate (Droplet/sec)	Acoustic RMS (mean: mVolt)	Frequency peak (Hz)
Short-circuiting	157.97	21.82	140.10	25	133.31	2250
Globular	237.89	27.02	264.03	110	79.74	5580
Spray	290.45	31.86	339	265	38.73	240

การถ่ายโอนน้ำโลหะ ในกระบวนการเชื่อม GMAW นั้นสามารถใช้เทคนิคการตรวจจับคลื่นเสียงที่เกิดจากการถ่ายโอนน้ำโลหะแต่ละรูปแบบแสดงความแตกต่างของการถ่าย

โอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยด และการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบฟุ้งได้ทั้งในรูปแบบของสัญญาณเสียงในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ เนื่องจาก

การถ่ายโอนน้ำโลหะแต่ละรูปแบบนั้นมีกายภาพทางการถ่ายโอนที่แตกต่างกัน จึงทำให้แหล่งกำเนิดเสียงให้เสียงที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน จึงสามารถใช้คุณลักษณะทางเสียงที่เป็นรากที่สองมีซิมมิกำลังสองของคลื่นเสียงมาทำการบ่งชี้รูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะในโดเมนเวลาได้อีกทั้งความสามารถทางการแยกแยะการถ่ายโอนน้ำโลหะในรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน ด้วยการวิเคราะห์สัญญาณผ่านทางสเปกตรัมของคลื่นเสียงได้อย่างเด่นชัด ดังนั้นการใช้วิธีการตรวจจับคลื่นเสียงที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยการสัมผัสของหัวตัวสอบจากของแข็งในระบบของการเชื่อมนั้น มีความเป็นไปได้ทางการประยุกต์ใช้ในการเฝ้าพินิจกระบวนการเชื่อมที่ต้องการตรวจจับลักษณะทางการถ่ายโอนน้ำโลหะเพื่อควบคุมคุณภาพของแนวเชื่อมของกระบวนการเชื่อม และการวิเคราะห์การถ่ายโอนน้ำโลหะด้วยการใช้เทคนิคนี้ จะช่วยลดวิธีการวิเคราะห์จากการคาดการณ์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ต้องอาศัยการตั้งสมมติฐานที่มีความซับซ้อนได้

การศึกษาการถ่ายโอนน้ำโลหะในกระบวนการเชื่อม GMAW ผ่านเทคนิคการตรวจจับทางคลื่นเสียงนี้ จะเป็นเทคนิคที่จะสามารถใช้วิเคราะห์ผลกระทบต่างๆ ของการถ่ายโอนน้ำโลหะ ที่เกิดจากตัวแปรต่างๆ ในที่ใช้ในการเชื่อมได้ โดยมีแนวโน้มทางการประยุกต์ใช้ทางการศึกษาการถ่ายโอนน้ำโลหะในช่วงของกระแสของการเปลี่ยนแปลง ที่มีรูปแบบของการถ่ายโอนที่ซับซ้อน เพื่อใช้บ่งบอกถึงผลของระดับของพารามิเตอร์ในการเชื่อมที่มีผลทางอัตราการถ่ายโอนน้ำโลหะ

เอกสารอ้างอิง

American Welding Society. 2001. Welding Hand Book, Vol. 1: Welding Science and technology, 9th ed., American Welding Society, Miami, FL.

American Welding Society. 2001. Welding Hand Book, Vol. 2: Welding Processes, 9th ed., American Welding Society, Miami, FL.

Chu, Y.X., Hu, S.J., Hou, W.K., Wang, P.C. and Marin, S.P. 2004. Signature Analysis for Quality Monitoring in Short-Circuit GMAW, *Welding J.*, 81(12): 336-343.

Etter, D.M. 1993. Engineering Problem Solving with MATLAB, Prentice-Hall, New Jersey.

Grad, L., Grumm, J., Polajnar, I., Slabe, J.M. 2004, Feasibility study of acoustic signal for on-line monitoring in short circuit gas metal arc welding. *Intl. J. Machine Tools & Manufacture*, 44: 555-561.

Jones, L.A., Eagar, T.W. and Lang, J.H. 1998. Magnetic Forces acting on molten drop in gas metal arc welding, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 31: 93-106.

Lancaster, J.F. 1986. THE PHYSIC OF WELDING. The International Institute of Welding, Pergamon press, New York.

Mayer, J.L. 1987. Application of acoustic emission to in process monitoring of submerged arc welding, *IIW Doc V-WG3-29-87*.

Pintrad, J. 1996a. Formation et Croissance des Gouttes. Forces auxquelles elles sont surmises avant et pendant le transfert, *IIW Document 212-89-66*.

Wang, Y.W. and Zhao, P.S. 2001. Noncontact Acoustic analysis monitoring of plasma arc welding, *Intl. J. Pressure Vessel and Piping* 78(1): 43-47.

Wang, F., Hou, W.K., Hu, S.J., Kannatey-Asibu, E., Shultz, W.W., and Wang, P.C. 2003. Modeling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36: 1143-2252.

Wang, G., Huang, P.G. and Zhang, Y.M. 2003. Numerical Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding, *Metallurgical and Materials Transactions. Volume 34B* : 345.