



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การระบุแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกและการแยกแยะ
ความรุนแรงของการกีดกร่อนด้วยสัญญาณอะคูสติกอิมิตชัน

โดย รศ.ดร.อาษา ประทีปเสน และคณะ

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การระบุแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกและการแยกแยะ
ความรุนแรงของการกีดกันด้วยสัญญาณอะคูสติกอิมมิตชัน

คณะผู้วิจัย

สังกัด

รศ.ดร.อาษา ประทีปเสน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

**การระบุแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกและการแยกแยะความรุนแรงของการ
กักกร่อนด้วยสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์**

อาษา ประทีปเสน^{1*} และกอบบุญ หล่อทองคำ²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

²ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้แสดงการนำเอาวิธีการทดสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ไปใช้ตรวจจับสัญญาณอะคูสติก (คลื่นเสียง) ที่ปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการกักกร่อน ทั้งจากเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) และเหล็กกล้าอะลูมิเนียม (A36) สำหรับวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 2 การทดลอง โดยใช้ความเข้มข้นของสารเคมีที่แตกต่างกันคือ ใช้กรดเข้มข้นซึ่งมีส่วนผสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ และใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 เปอร์เซ็นต์ พร้อมทั้งเร่งให้เกิดการกักกร่อนโดยวิธีไฟฟ้าเคมี จากการทดลองพบว่าสัญญาณอะคูสติกสามารถตรวจจับได้ระหว่างเกิดการกักกร่อน และได้นำสัญญาณการกักกร่อนไปวิเคราะห์หาต้นกำเนิดของเสียง จากงานวิจัยพบว่าต้นกำเนิดเสียงของกรณีที่ใช้กรดเข้มข้นคือ เสียงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากการแตกและระเบิดของฟองไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี ในขณะที่ในการทดลองที่เร่งด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี ต้นกำเนิดเสียงได้แก่การแตกของพาสซีฟฟิล์มและการกักกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting corrosion) หลังจากนั้นได้นำสัญญาณอะคูสติกไปแบ่งระดับความรุนแรงของการกักกร่อนออกเป็น 5 ระดับ ตามความลึกของวัสดุที่ถูกกักกร่อน โดยใช้วิธีเซมิพารามิเตอร์ (Seme-parametric) ผลการแบ่งระดับแสดงให้เห็นประสิทธิภาพที่ดีที่จะนำไปใช้ในการทำนายความรุนแรงของการกักกร่อน นอกจากนี้ได้ทำการสร้างระบบการวิเคราะห์หาตำแหน่งของการเกิดสัญญาณอะคูสติกโดยใช้ FPGA-PC (Field Programmable Gate Array PC) ซึ่งเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ โดยได้ทดลองระบบและพบว่าระบบระบุตำแหน่งการกักกร่อนได้อย่างถูกต้อง สำหรับการทดลองในเหล็กกล้าอะลูมิเนียมได้ทำให้เกิดการกักกร่อนแบบยูนิฟอร์มโดยการใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกต่างๆ กัน ในผลการวิจัยได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอะคูสติกกับความเข้มข้นของปริมาณซัลเฟอร์และค่าของ PH

คำสำคัญ : การกักกร่อน แหล่งกำเนิดอะคูสติกอิมพัลส์ กรดซัลฟูริก การแยกแยะ FPGA

AE Source Identification and Classification of Corrosion Severity by AE Signal

Prateepasen, A.^{1*} and Lothongkum, G.²

¹*Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi*

126 Prachautid, Bangmod, Toongkru, Bangkok, 10140

²*College of Engineering, Chulalongkorn University, Phaya Thai Road, Bangkok 10330*

Abstract

In this research Acoustic Emission Testing (AET) was implemented to detect AE signal released from corrosion process in austenitic stainless steel (AISI 304) and mild steel (A36). For stainless steel, two tests were conducted at room temperature using an acidic 30% Chloride solution and 3% Chloride solution accelerated by electrochemical process respectively. It appeared that AE signals could be detected during corrosion process and AE source obtained from corrosion were identified. AE sources in high concentration chloride test mainly are impact and burst of hydrogen bubble whereas in electrochemical corrosive test the AE sources are passive film breakage and pitting corrosion. Subsequently the corrosion severity is graded roughly into five levels based on the depth of corrosion by using a semi-parametric scheme for learning the mixture model. The results showed good performance to predict corrosion severity. Furthermore, a novel low-cost AE location system based on a Field Programmable Gate Array PC (FPGA-PC) was established. The corrosion positions detected by the system displayed the correct positions. For mild steel, the uniform corrosion mechanism in various concentrations of Sulfuric acid (H_2SO_4) solution was studied. The relationship between AE signals and sulphur concentrations as well as pH were exhibited.

Keywords: Corrosion, Acoustic Emission Source, Sulfuric acid, Classification, FPGA

Executive Summary

การระบุแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกและการแยกแยะความรุนแรงของการ กักกรองด้วยสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การกักกรองเป็นบ่อเกิดของความเสียหายต่อวัสดุและเครื่องมือต่างๆ เทคโนโลยีในปัจจุบันก็ทำได้เพียงแต่ลดอัตราการกักกรอง เช่น ใช้วิธีการเลือกวัสดุที่ทนต่อการกักกรอง หรือใช้การเคลือบผิว เป็นต้น ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนของความเสียหายที่เกิดในงานทางวิศวกรรม เช่น การกักกรองที่พื้นของถังพักขนาดใหญ่ (Storage tank floor) ในภาชนะรับแรงดัน (Pressure vessel) และท่อแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น ตัวอย่างการตรวจสอบการกักกรองหรือสนิมบริเวณพื้นของถังพักในประเทศไทยในปัจจุบันใช้วิธีการถ่ายของเหลว เช่น น้ำมันออกจากถังและทำความสะอาดเพื่อใช้วิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลายวิธีดั้งเดิม เช่น การตรวจสอบด้วยตาเปล่าและการวัดการรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก เป็นต้น ข้อจำกัดของการใช้การตรวจสอบวิธีดั้งเดิมนี้คือ ใช้เวลาในการตรวจสอบต่อถัง 1 ใบเป็นเวลาหลายสัปดาห์ หรืออาจถึง 1 – 2 เดือน และค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบนับล้านบาท

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการนำเอาวิธีการตรวจสอบโดยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน ซึ่งประเทศไทยยังต้องพึ่งพาเทคโนโลยีนี้จากต่างประเทศ มีหลักการคือการตรวจจับคลื่นเสียงของการกักกรองโดยใช้ หัวรับสัญญาณติดไว้ที่บริเวณข้างถัง หัวรับสัญญาณจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณของการ กักกรองเป็นพารามิเตอร์ของ AE (AE – parameter) ซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์แบ่งแยกระดับความรุนแรง เพื่อกำหนดสถานะของสนิมและการกักกรองว่าอยู่ในสภาวะรุนแรงเพียงใด โดยจะแบ่งออกเป็น 5 ระดับ ข้อได้เปรียบคือการตรวจสอบสามารถเสร็จสิ้นภายในระยะเวลาเพียง 1 – 2 วัน และลดค่าใช้จ่ายและลดอันตรายจากอุบัติเหตุของผู้ตรวจสอบที่มักเกิดขึ้นเสมอ

นอกจากนั้นในการวิจัยนี้จะยังวิจัยเพื่อให้ได้องค์ความรู้ใหม่ในเรื่องของแหล่งกำเนิดของการกักกรองซึ่งยังมีการนำเสนอที่ขัดแย้งกันอยู่ระหว่างนักวิจัยที่ผ่านมาว่าเป็นเนื่องจากฟองแก๊สไฮโดรเจนหรือเป็นเนื่องจากการกักกรองเอง หรือเป็นเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดทั้ง 2 ชนิด ซึ่งผลของการวิจัยนี้จะทำให้การวินิจฉัยความรุนแรงของการกักกรองได้ดีแม่นยำยิ่งขึ้น และในการวิจัยนี้จะได้มีการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคการประมวลสัญญาณ และเทคนิคการแยกแยะในแบบต่างๆ พร้อมทั้งเลือกตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทำนายความรุนแรงของการกักกรองได้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ในตอนท้ายจะเป็นการศึกษาผลกระทบอื่นๆที่มีผลอัตราการกักกรอง เช่น ความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการกักกรอง และจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสัญญาณอะคูสติกอิมิชชันนั่นเอง

ผลของงานวิจัยนี้จะทำให้เป็นการพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจสอบการกักกรองด้วยอะคูสติกอิมิชชันให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น และนำไปใช้ได้ในอุตสาหกรรมไทยซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าตรวจสอบได้นับพันล้านบาท

2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อวิจัยและพัฒนาวิธีการตรวจสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมมิชชัน เพื่อใช้ตรวจสอบการกัดกร่อน
2. เพื่ออธิบายว่าแหล่งกำเนิดเสียงหรือคลื่นอะคูสติกนั้น มาจากกลไกหรือปฏิกิริยาใดของการกัดกร่อน
3. เพื่อค้นหาวิธีและพัฒนาวิธีการประมวลผลสัญญาณเพื่อการทำนายผลแม่นยำยิ่งขึ้น
4. เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนอัตราการกัดกร่อน เช่น จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของซัลเฟอร์ของสารละลายว่ามีผลต่อสัญญาณอะคูสติกอย่างไร

3. ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ AE กับอัตราการกัดกร่อนโดยใช้วัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304
2. ศึกษาแหล่งกำเนิดเสียง AE จากกลไกหรือปฏิกิริยาการกัดกร่อนว่ามาจากแหล่งใด และในแต่ละแหล่งมีผลต่อความรุนแรงต่อสัญญาณ AE อย่างไร
3. ทำซ้ำข้อ 1 และ 2 โดยเปลี่ยนชนิดวัสดุเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน
4. ค้นหาเทคนิควิธีการแยกแยะข้อมูล เพื่อแบ่งกลุ่มของความรุนแรงของการกัดกร่อนอย่างถูกต้องแม่นยำ
5. ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย เป็นต้น

4. แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

กิจกรรม	ระยะเวลา (เดือน)					
	1 - 4	5 - 8	9 - 12	13 - 16	17 - 20	21 - 24
กิจกรรมที่ 1	←→					
กิจกรรมที่ 2	←→					
กิจกรรมที่ 3		←→				
กิจกรรมที่ 4		←→				
กิจกรรมที่ 5				←→		→

ตารางผลงานในแต่ละช่วงเวลา

5. ผลงาน

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ การบรรยายในงานสัมมนาให้กับกลุ่มผู้ต้องการใช้เทคโนโลยี และการทดลองใช้เทคโนโลยีมีดังต่อไปนี้

1. Prateepasen A., Jirarungsatean C. and Tuengsook P., 2006, "Effect of Sulfuric Acid Concentration on Acoustic Emission Signals Obtained from Uniform-Corrosion", Journal of Key Engineering Materials, Vols. 321-323, pp. 553-556. (Impact factor 0.278)
2. Prateepasen A., Jirarungsatean C. and Tuengsook P., 2006, "Identification of AE Source in Corrosion Process", Journal of Key Engineering Materials, Vols. 321-323, pp. 545-548. (Impact factor 0.278)
3. Prateepasen A., Kaewtrakulpong P. and Jirarungsatean C., 2006, "Semi-Parametric Learning for Classification of Pitting Corrosion Detected by Acoustic Emission", Journal of Key Engineering Materials, Vols. 321-323, pp. 549-552. (Impact factor 0.278)
4. Jomdecha C., Prateepasen A. and Kaewtrakulpong P., 2007, "A Study on Source Location Using an Acoustic Emission System on Various Types of Corrosion " IN PRESS in NDT&E International. (Impact factor 1.047)
5. เณลิมเกียรติ จิระรุ่งเสถียร, อาษา ประทีปเสน และ เมธิณี มุกดาสิริ, 2550, "ผลของการถ่ายเทประจุทางไฟฟ้าเคมีต่อสัญญาณอะคูสติกในการตรวจจับการกัดกร่อนด้วยวิธีอะคูสติกอิมมิชชัน", วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 30 ฉบับที่ 2 เมษายน – มิถุนายน.
6. อาษา ประทีปเสน และ มนต์รี กุตัน , 2550, "การตรวจจับการกัดกร่อนแบบยูนิฟอร์มในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและรอยเชื่อมด้วยวิธีอะคูสติกอิมมิชชัน",วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, Vol. 14(1), มกราคม – เมษายน.
7. Prateepasen A., Lothongkum, G., and Jirarungsatean C, "Corrosion Detection on various Metal Micro Structures by Acoustic Emission" to be submitted to Materials science and engineering A-structural materials properties micro structure and processing. (Impact factor 1.445)
8. Jirarungsatean C, Prateepasen A and Tuengsook P, "Pitting and Uniform Corrosion Source Recognition by AE Parameters", to be submitted to Corrosion science. (Impact factor 1.714)
9. การสัมมนาหัวข้อ การใช้อะคูสติกอิมมิชชันในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ให้แก่วิศวกรกลุ่มอุตสาหกรรมปิโตรเคมีจำนวน 6 บริษัท วันที่ 6 มิ.ย. 2549 ณ. บริษัท PPTChem นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จ.ระยอง มีวิศวกรเข้ารับฟังการบรรยายประมาณ 30 คน
10. การสัมมนาหัวข้อ การใช้อะคูสติกอิมมิชชันในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ให้แก่ผู้บริหารกลุ่มอุตสาหกรรมปิโตรเคมีจำนวน 6 บริษัท วันศุกร์ที่ 11 พฤษภาคม 2007 ณ Pattaya Bella Villa Cabana จ. ชลบุรี มีผู้บริหารเข้ารับฟังการบรรยายประมาณ 30 คน

เนื้อหางานวิจัย

7. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยจะประกอบไปด้วย 4 ส่วน ซึ่งได้แก่

- การตรวจสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน (Acoustic Emission)
- การกัดกร่อน (Corrosion)
- แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกในกระบวนการกัดกร่อน
- การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดอะคูสติกโดยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน

7.1. หลักการเบื้องต้น

การทดสอบโดยไม่ทำลายด้วยวิธีอะคูสติก อิมิชชัน (Acoustic Emission : AE) เป็นวิธีหนึ่งในการทดสอบหรือประเมินสภาพของวัสดุแบบไม่ทำลาย การทดสอบด้วยวิธีนี้แตกต่างจากการทดสอบโดยไม่ทำลายวิธีดั้งเดิมอื่นๆ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Testing, UT) ภาพถ่ายรังสี (Radiographic Testing, RT) อนุภาคแม่เหล็ก (Magnetic Particle Testing, MT) กระแสไหลวน (Eddy Current Testing, ET) และ สารละลายแทรกซึม (Liquid Penetrant Testing, PT) เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีดั้งเดิมเหล่านี้ เป็นการทดสอบหลังจากที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุแล้ว ส่วนการทดสอบด้วยวิธี AE สามารถตรวจพบรอยความไม่ต่อเนื่องในขณะที่กำลังเกิดหรือกำลังขยายตัว ได้ทั้งในระดับอนุภาค (micro structure) เช่นการที่มีอะตอมขาดหายไป (vacancy) หรือการที่มีอะตอมเกิน (interstitial) และในระดับมหภาค (macro structure) เช่นการแตกร้าว (crack) โดยรอยความไม่ต่อเนื่องจะเป็นตัวปลดปล่อยพลังงานออกมาในลักษณะคลื่นเสียง ดังนั้นข้อได้เปรียบของการทดสอบด้วยวิธีนี้เมื่อเทียบกับการทดสอบโดยไม่ทำลายวิธีดั้งเดิมอื่นๆ คือเป็นการทดสอบแบบเวลาจริง (real time) สามารถใช้เฝ้าระวังเตือนภัยล่วงหน้าก่อนที่ความเสียหายจะลุกลาม นอกจากนั้น การทดสอบด้วย AE ยังครอบคลุมผลการทดสอบเป็นบริเวณกว้างในการทดสอบในคราวเดียว

7.1.1 ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของการทดสอบ

ข้อได้เปรียบของการทดสอบ

- ทดสอบได้ในขณะที่รอยความไม่ต่อเนื่องกำลังเกิดและ/หรือกำลังขยายตัว สามารถใช้เป็นวิธีเฝ้าระวัง
- ครอบคลุมพื้นที่ในการทดสอบเป็นบริเวณกว้างของการทดสอบในคราวเดียว
- มีความต้องการ การเข้าถึงชิ้นงานเพื่อการทดสอบน้อยกว่าการทดสอบวิธีอื่น
- ทดสอบได้โดยไม่ต้องหยุดกระบวนการผลิต หรือการทำงานของอุปกรณ์

ข้อเสียเปรียบของการทดสอบ

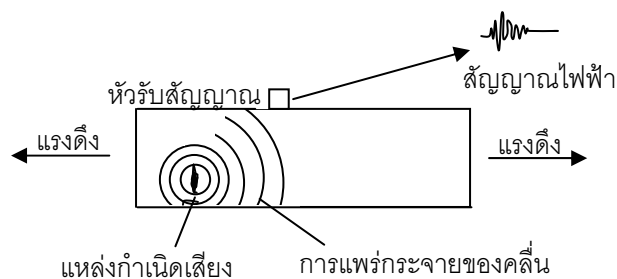
- สัญญาณรบกวนของสภาวะแวดล้อม และอุปกรณ์การทำงาน ถ้ามีความถี่ของคลื่นเสียงอยู่ในย่านเดียวกันกับคลื่นเสียงที่ปลดปล่อยจากรอยความไม่ต่อเนื่อง อาจทำให้การทดสอบทำได้ยากหรือทำไม่ได้ ถ้าไม่สามารถกรองสัญญาณรบกวนออก
- เมื่อความเสียหายนั้นเกิดขึ้นและผ่านไปแล้ว ไม่สามารถทำการทดสอบซ้ำได้อีก ข้อมูลที่ตรวจจับได้ใหม่จะเป็นข้อมูลของรอยความไม่ต่อเนื่องครั้งใหม่ หรือของความเสียหายเก่าที่กำลังขยายตัว

7.1.2 ทฤษฎีการทดสอบด้วยอะคูสติกอิมพัลส์

ระบบการทดสอบด้วยอะคูสติก อิมพัลส์

อะคูสติกอิมพัลส์ ใช้หลักการตรวจจับพลังงานซึ่งอยู่ในรูปของคลื่นยืดหยุ่นแบบชั่วคราว (Transient elastic wave) ที่ปลดปล่อยจากรอยความไม่ต่อเนื่องของวัสดุ การตรวจจับคลื่นยืดหยุ่นสามารถทำได้โดยใช้หัวตรวจสอบ (Sensor) ยึดติดที่ผิวหน้าของวัสดุ หัวตรวจสอบจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานในรูปของคลื่นเสียงให้เป็นคลื่นไฟฟ้า และสัญญาณคลื่นไฟฟ้าจะถูกขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น (Pre-amplifier) และส่งผ่านไปยังตัวกรองความถี่ (Filter) เพื่อกรองความถี่บางช่วงความถี่ออก และส่งผ่านสัญญาณนั้นไปวิเคราะห์เทียบกับขนาดหรือความรุนแรงของรอยความไม่ต่อเนื่อง การวิเคราะห์สัญญาณอาจทำได้ทั้งในโดเมนเวลา (Time domain) และโดเมนความถี่ (Frequency domain) หรือใช้ร่วมกันทั้งโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (Joint time frequency domain) ความถี่ที่นำไปวิเคราะห์โดยทั่วไปมักอยู่ในช่วงตั้งแต่ 25 กิโลเฮิร์ต จนถึง 3 เมกะเฮิร์ต แต่ความถี่ที่นิยมใช้วิเคราะห์ในงานต่างๆ มักอยู่ในช่วงตั้งแต่ 100 กิโลเฮิร์ตถึง 1 เมกะเฮิร์ต AE มีความไวในการตรวจสอบ (Sensitivity) สูงมาก คลื่นผิว (Surface wave) ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของวัสดุที่ทำให้เกิดระยะขจัด (Displacement) ที่มีขนาดเล็กเพียง 10^{-14} นิ้ว สามารถตรวจพบได้โดยใช้หัวตรวจสอบที่มีความไวสูง

ในรูปที่ 7.1 แสดงตัวอย่างระบบการทดสอบด้วย AE โดยเมื่อวัตถุชนิดหนึ่งถูกแรงดึงกระทำที่ปลายทั้งสองจนกระทั่งเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) หรือเกิดการแตกในเนื้อวัสดุ รอยแตกนั้นจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดเสียงทั้งแบบคลื่นตามยาว (longitudinal wave) และคลื่นตามขวาง (transverse wave) คลื่นทั้งสองชนิดจะเคลื่อนที่ไปทุกทิศทางจนถึงที่ผิวของวัสดุและทำให้เกิดคลื่นผิวขึ้น หัวตรวจสอบที่ติดตั้งไว้ที่ผิวของวัสดุก็จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลของคลื่นเสียงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และสัญญาณทางไฟฟ้านั้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 7.1 แสดงตัวอย่างระบบการทดสอบด้วย AE

แหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติก

แหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติก จะอยู่ในรูปแบบต่างๆ ของการเกิดการเสียรูป (Deformation) หรือ การเกิดการแตกร้าว ตัวอย่างของต้นกำเนิดคลื่นอะคูสติกที่ทำให้เกิดสัญญาณขนาดใหญ่มากได้แก่การ เกิดแผ่นดินไหว หรือการเกิดสัญญาณขนาดเล็กเช่น การบิดตัวที่ไม่เท่ากันของอะตอม (Twining) หรือ การไถลเสียรูประหว่างขอบเกรน (Grain boundary sliding) เป็นต้น การเสียรูปของวัสดุซึ่งจะเกิดขึ้น ก่อนถึงจุดล้าตัว (Yield point) หรือก่อนที่จะแตกหักนั้นไม่สามารถตรวจจับด้วยการทดสอบโดยไม่ ทำลายวิธีอื่น แต่สามารถตรวจจับด้วยวิธี AE ได้

ต้นกำเนิดเสียงอะคูสติกอีกแบบหนึ่งคือ ต้นกำเนิดเสียงที่มีได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงในเนื้อ ของวัสดุโดยตรงเช่น เสียงที่เกิดจากการรั่ว (Leak) ของก๊าซหรือของเหลว เสียงที่เกิดจากควิเตชัน (Cavitation) หรือเสียงที่เกิดจากการเสียดสี (Friction) เป็นต้น แหล่งกำเนิดเสียงประเภทนี้จัดว่าเป็น แหล่งกำเนิดเสมือน (Pseudo sources)

7.1.3 อุปกรณ์การทดสอบด้วยอะคูสติกอิมิชชัน

อุปกรณ์ชุดทดสอบ AE มีส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

หัวตรวจสอบ

ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลของคลื่นเสียงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปมีอยู่ 2 ชนิดคือ แบบ สัมผัส (Contact) และแบบไม่สัมผัส (Non contact)

1. หัวตรวจสอบ แบบสัมผัส หัวตรวจสอบชนิดนี้จะติดตั้งโดยการสัมผัสกับวัตถุที่จะทดสอบ โดยตรง ใช้สารช่วยสัมผัส (Couplant) ในการช่วยให้การส่งผ่านคลื่นเสียงได้ดียิ่งขึ้น ชนิด ของสารช่วยสัมผัสจะเป็นชนิดเดียวกันกับการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง การยึดติดกับ วัตถุที่จะทดสอบอาจทำได้โดยใช้แม่เหล็ก เทปกาว หรือการใช้ฮ็อทกชี ภายในหัว ตรวจสอบชนิดนี้จะมีลักษณะเหมือนกับหัวตรวจสอบคลื่นเสียงความถี่สูง ซึ่งประกอบด้วย แผ่นรองหลัง (Backing material) และฮ็อทกชีที่ทำหน้าที่ให้หัวตรวจสอบรักษารูปร่างและ ตำแหน่งอยู่ได้ ภายในหัวตรวจสอบจะมีผลึกซึ่งปัจจุบันนิยมใช้ผลึกชนิด PZT (Lead Zirconate Titanate) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลของคลื่นเสียง (ที่ส่งผ่านมาจากรอยความ ไม่ต่อเนื่อง) เป็นพลังงานทางไฟฟ้า และส่งต่อสัญญาณผ่านสายเคเบิลไปยังอุปกรณ์ขยาย

สัญญาณเบื้องต้น ในรูปที่ 7.2 แสดงหวัตรวสอบซึ่งต่ออยู่กับอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้นซึ่งติดตั้งอุปกรณ์กรองสัญญาณอยู่ภายใน

2. หวัตรวสอบ แบบไม่สัมผัส ใช้หลักการการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงระยะขจัดที่เกิดขึ้นที่ผิวของวัตถุที่ทดสอบ และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ในหวัตรวสอบแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electromagnetic transducer) หรือการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าในหวัตรวสอบแบบคาปาซิแตนซ์ (Capacitance transducer)

อุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น

ทำหน้าที่ขยายสัญญาณทางไฟฟ้าให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ปกติแล้วอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้นควรอยู่ใกล้กับหวัตรวสอบมากที่สุด (ประมาณ 1 เมตร) เพื่อทำการขยายสัญญาณก่อนที่สัญญาณจะถูกลดทอนลง เมื่อถูกส่งผ่านสายเคเบิลหรืออุปกรณ์อื่น อุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้นบางครั้งจะถูกออกแบบให้บรรจุอยู่ในหวัตรวสอบ

อุปกรณ์กรองสัญญาณ

มักจะติดตั้งอยู่ภายในอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น เพื่อทำหน้าที่กรองสัญญาณเสียงในย่านความถี่ที่ไม่เกี่ยวข้อง หรือสัญญาณรบกวน (Noise) ออกไป อุปกรณ์กรองสัญญาณมี 3 ชนิดคือ

1. แบบไฮพาส (Hi – pass) จะยอมให้เฉพาะสัญญาณที่มีความถี่สูงผ่าน เช่น 100 KHz Hi – pass จะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่า 100 กิโลเฮิร์ตผ่าน
2. แบบแบนด์พาส (Band – pass) จะยอมให้เฉพาะสัญญาณที่มีความถี่อยู่ในช่วงที่กำหนดผ่าน เช่น 100 – 300 KHz Band – pass จะยอมให้สัญญาณที่อยู่ในช่วง 100 กิโลเฮิร์ต ถึง 300 กิโลเฮิร์ตผ่าน
3. แบบโลพาส (Low – pass) จะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำผ่าน เช่น 100 KHz Low – pass จะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่า 100 กิโลเฮิร์ตผ่าน

แบบแบนด์พาส จะเป็นแบบที่ใช้กันมากกว่าชนิดอื่น เนื่องจากโดยปกติในการทดสอบด้วย AE มักต้องการตัดเสียงรบกวนทั้งความถี่สูงและต่ำออก เช่น ตัดความถี่ต่ำจากการสั่นสะเทือนออก และตัดเสียงรบกวนเช่นจากสัญญาณทางไฟฟ้า หรือจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความถี่สูงออก

อุปกรณ์รับและประมวลสัญญาณ (Discriminator)

ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณจากอนาล็อก (Analog) เป็น ดิจิตอล (Digital) และ ประมวลสัญญาณนั้นให้อยู่ในรูปของอะคูสติคพารามิเตอร์ (AE parameter) อุปกรณ์รับและประมวลสัญญาณแสดงไว้ดังในรูปที่ 7.3 แต่สำหรับงานวิจัยนอกจากข้อมูลทางโดเมนเวลาแล้ว มักจำเป็นต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์บันทึกข้อมูลทางด้านโดเมนความถี่ด้วย เพื่อใช้วิเคราะห์หาคุณลักษณะของสัญญาณ เช่น ความถี่ของสัญญาณที่ปลดปล่อยจากรอยความไม่ต่อเนื่องและสัญญาณรบกวน เพื่อเลือกอุปกรณ์และอะคูสติคพารามิเตอร์ที่

เหมาะสมต่อการทดสอบ ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่สามารถบันทึกได้ทั้งทางโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ แสดงไว้ดังในรูปที่ 7.4

อุปกรณ์ชุดทดสอบ AE ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ทั้งหมดตั้งแต่ในข้อ 1-4 แสดงไว้ดังในรูปที่ 7.5 ส่วนอุปกรณ์ทดสอบสำหรับทดสอบงานในภาคสนามจะมีขนาดเล็กกว่า ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการพกพา



รูปที่ 7.2 แสดงหัวตรวจสอบและอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น
ซึ่งติดตั้งอุปกรณ์กรองสัญญาณอยู่ภายใน



รูปที่ 7.3 อุปกรณ์รับและประมวลสัญญาณ ทางโดเมนเวลารุ่น LOCAN 320



รูปที่ 7.4 อุปกรณ์รับสัญญาณทั้งโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ Spectrum Analyzer



รูปที่ 7.5 อุปกรณ์ชุดทดสอบ AE

7.1.4 ชนิดของคลื่น (Type of wave)

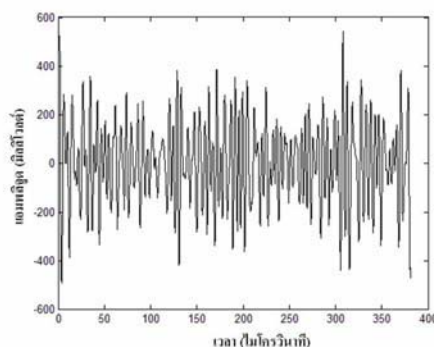
คลื่นเสียงทางกลที่ปลดปล่อยออกจากวัสดุและตรวจจับด้วยหัวตรวจสอบนั้น คลื่นเสียงชนิดคลื่นผิว (Surface wave) มักส่งผลมากกว่าคลื่นชนิดตามยาว (Longitudinal wave) และคลื่นตามขวาง (Shear wave) ทั้งนี้เนื่องจากมีแอมพลิจูดของระยะขจัดที่สูงกว่า และการลดทอนของพลังงานน้อยกว่า คลื่นชนิดอื่นเนื่องจากการเคลื่อนที่ไปบนผิวของวัสดุ เมื่อหัวตรวจสอบเปลี่ยนคลื่นเสียงทางกลเป็นคลื่นเสียงทางไฟฟ้าแล้ว สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

แบบต่อเนื่อง (Continuous)

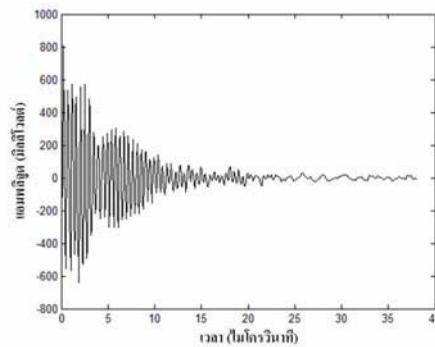
เป็นคลื่นที่เกิดต่อเนื่องกันไป ดังแสดงในรูปที่ 7.6 เช่น สัญญาณเสียงจากการรั่วของวาล์วเป็นต้น พารามิเตอร์ที่มักใช้วิเคราะห์ข้อมูลกับสัญญาณแบบต่อเนื่องคือ ค่าระดับสัญญาณเฉลี่ย (ASL) หรือ AErms เป็นต้น

แบบเป็นช่วง (Burst)

เป็นคลื่นที่มีลักษณะเกิดขึ้นเป็นช่วง ดังแสดงในรูปที่ 7.7 พารามิเตอร์ที่นิยมใช้วิเคราะห์ข้อมูลกับงานที่มีสัญญาณแบบเป็นช่วง ได้แก่ เคานท์ (Count) หรือ ฮิต (Hit) เป็นต้น



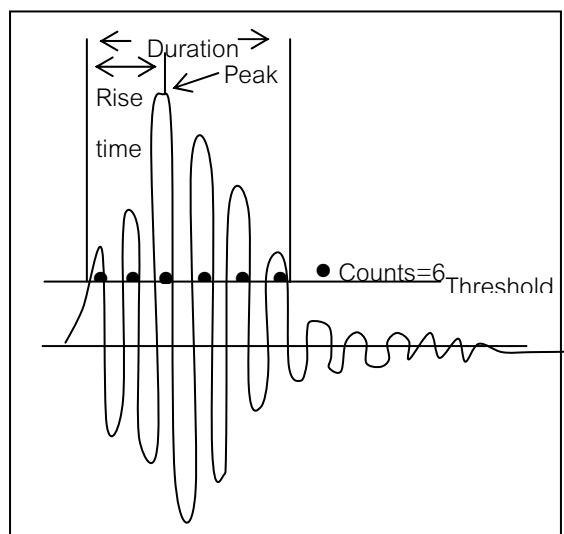
รูปที่ 7.6 แสดงคลื่นเสียงที่มีลักษณะแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 7.7 แสดงคลื่นเสียงที่มีลักษณะแบบเป็นช่วง (Burst)

7.1.5 อะคูสติกพารามิเตอร์

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าสัญญาณทางไฟฟ้าจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น จะถูกนำไปวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปของอะคูสติกพารามิเตอร์ โดยอุปกรณ์รับและประมวลผลสัญญาณอะคูสติกพารามิเตอร์ที่นิยมใช้กันอยู่ในงานสนามโดยทั่วไปคือพารามิเตอร์ที่ประมวลผลมาจากทางโดเมนเวลาและที่นิยมใช้กันมากที่สุดและยังใช้กันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบันได้แก่ “เคาท์” (Count) อะคูสติกพารามิเตอร์ที่สำคัญในทางโดเมนเวลาแสดงไว้ดังในรูปที่ 7.8



รูปที่ 7.8 แสดงอะคูสติกพารามิเตอร์

ความหมายของพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

- เคาท์ คือจำนวนครั้งที่สัญญาณคลื่นอะคูสติกมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold) จากตัวอย่างในรูปที่ 7.8 จำนวน “เคาท์” มีค่าเท่ากับ 6

- แอมพลิจูดสูงสุด (peak amplitude) คือขนาดของค่าสูงสุดของแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นอะคูสติก
- ไรส์ไทม์ (Risetime) คือระยะเวลาที่เริ่มนับตั้งแต่สัญญาณที่มีค่าสูงกว่าขีดเริ่มเปลี่ยนจนถึงเวลาที่สัญญาณมีขนาดแอมพลิจูดสูงสุด
- ดูเรชันไทม์ (Duration time) คือระยะเวลาที่เริ่มนับตั้งแต่สัญญาณที่มีค่าสูงกว่าขีดเริ่มเปลี่ยนจนถึงเวลาที่สัญญาณต่ำกว่าขีดเริ่มเปลี่ยน
- พลังงาน (Energy) คือพลังงานของคลื่นอะคูสติกที่เทียบได้จากการอินทิเกรตแรงดันไฟฟ้าที่ ยกกำลังสอง เทียบกับเวลาแล้วหารด้วยความต้านทานไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัด ดังแสดงในสมการ

$$U = \frac{1}{R} \int_0^t V^2(t) dt \quad (1)$$

โดยที่	U	คือ	ค่าพลังงาน
	R	คือ	ความต้านทานไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัด
	t	คือ	เวลา
V(t)	คือ	ค่าแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่เวลา t	

นอกจากนั้นยังมีอะคูสติกพารามิเตอร์อื่นๆ ที่นิยมใช้กันแต่ไม่ได้ให้คำจำกัดความไว้ในที่นี้ เช่น อีเวนท์ (Event) ฮิต (Hits) ค่าเฉลี่ยของระดับสัญญาณ (Average signal level (หรือ ASL)) เป็นต้น ในการทดสอบการตั้งค่าขีดเริ่มเปลี่ยนมีความสำคัญมาก เนื่องจากจะทำให้ผลของอะคูสติกพารามิเตอร์หลายตัวเปลี่ยนตามไปด้วย โดยปกติจะเลือกค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมตามสัญญาณรบกวนในสภาพแวดล้อมที่กำลังทดสอบ

7.2 การกัดกร่อน [13,14]

ในความหมายอย่างกว้าง ๆ การกัดกร่อนจะหมายถึง การที่โลหะถูกทำลายด้วยขบวนการทางเคมี ไฟฟ้าเคมี หรือการปฏิสัมพันธ์ทางโลหะวิทยา (Metallurgical Interaction) ระหว่างวัสดุ กับ สิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปแล้วจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ แต่ดำเนินต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ในบางกรณีการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นเพียงรอยด่างหรือรอยคราบบางๆ บนผิวโลหะ ซึ่งอาจเป็นตัวหน่วงการเกิดการกัดกร่อนในช่วงต่อไปด้วยซ้ำ แต่ในบางกรณีรอยแผลอันเกิดจากการกัดกร่อนมีลักษณะกว้าง และลึก บริเวณ รอบๆ รอยกัดกร่อนจะมีรูพรุนเช่นนี้ยากที่จะหาทางป้องกันหรือยับยั้งได้ต่อไป

7.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อน

อัตราการไหล น้ำที่หยุดนิ่ง หรือไหลอย่างช้า ๆ (อัตราการไหล < 1.5 เมตรต่อวินาที) จะก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนมากกว่าน้ำที่ไหล ซึ่งอาจเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting Corrosion), การกัดกร่อนเนื่องจากความแตกต่างของปริมาณออกซิเจน (Oxygen Concentration Cells) แลกการกัดกร่อนเนื่องจากแบคทีเรีย (MIC-Microbiologically Influenced Corrosion) แต่ถ้าอัตราการไหลสูงกว่า 2.4 เมตรต่อวินาที สนิมหรือออกไซด์ที่ผิวเหล็กซึ่งเป็นตัวช่วยชะลอให้การกัดกร่อนช้าลงจะถูกทำลาย เป็นผลให้เกิดการกัดกร่อนแบบ Erosion – Corrosion อัตราการกัดกร่อนประมาณ 30 – 50 มิลลิเมตรต่อปี

อุณหภูมิ อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่เป็นตัวเร่งให้เกิดการกัดกร่อนที่สูง แต่จะต้องมีการพิจารณาควบคู่ไปกับปริมาณคลอไรด์ในน้ำด้วย เช่น ถ้าน้ำที่มีปริมาณคลอไรด์ต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ออกซิเจนจะละลายในน้ำได้น้อยลงทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง และถ้าสำหรับน้ำที่มีปริมาณคลอไรด์สูงที่อุณหภูมิเดียวกัน อัตราการกัดกร่อนจะไม่ลดลงแม้ว่าออกซิเจนในน้ำนั้นจะลดลงก็ตาม

ค่า pH คือค่าความเป็นกรด – ด่าง สารละลายคลอไรด์ที่มี $\text{pH} < 4$ หรือมีความเป็นกรดมากขึ้น หรือมี pH ยิ่งต่ำ อัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ $\text{pH} > 4$ ปฏิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นคือ Reduction of Oxygen ความเร็วของปฏิริยาจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการแพร่ของออกซิเจนซึ่งเป็นไปอย่างช้า ๆ

โดยที่ $\text{pH} < 4$ ปฏิริยารีดักชันที่เกิดขึ้น คือ Reduction of Hydrogen Ion ผลของปฏิริยาจะได้ก๊าซออกซิเจน ไฮโดรเจนอ็อกไซด์จะมีอยู่มาก เนื่องจากเป็นกรด ดังนั้นปฏิริยาการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และ ที่ $\text{pH} > 9$ ปฏิริยาการกัดกร่อนจะช้าลงมากเนื่องจากมีฟิล์มไฮดรอกไซด์ที่ผิวเหล็ก

สารเคมีอื่นๆ หากในน้ำมีคลอไรด์อยู่อย่างเดียว การเกิดการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นอย่างไม่ซับซ้อนนัก แต่ถ้ามีสารเคมีอื่นๆ อยู่ด้วยการกัดกร่อนจะซับซ้อนมากขึ้น เช่น ภาชนะความดันที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม 316 บนเหล็กกล้าภายในบรรจุเอสเทอร์ที่มีคลอไรด์ $\text{pH} \approx 4.5$ มีการเติม NaCl ลงในระบบด้วย ภาชนะใบนี้มีอายุการใช้งาน 16 ปี โดยไม่เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากความเค็ม มีเพียงหลุมตื้นๆ ไม่กี่หลุม ทั้งนี้เนื่องจากในภาชนะนี้มีแอมมีน (amine) และ โซเดียมอะซิเตต (sodium acetate) ซึ่งเป็นสารยับยั้งปนอยู่ด้วย

7.2.2 หลักการของไฟฟ้าเคมีสำหรับการกัดกร่อน

การกัดกร่อนโดยแท้จริงแล้วเป็นขบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่สำคัญยิ่ง ซึ่งอาจเกิดขึ้นกับส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งแท่งโลหะ จะมีการเปลี่ยนสภาพจากโลหะ (Metallic State) ซึ่งมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าไปเป็นโลหะที่มีประจุไฟฟ้า (Ionic State) ในกระบวนการกัดกร่อนจะมีการไหลของกระแสไฟฟ้าจากบริเวณใดบริเวณหนึ่งของผิวโลหะผ่านสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าไปสู่บริเวณอื่น หรือโลหะอื่น สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) คือ สารละลายที่มีอนุภาคไฟฟ้า อ็อกไซด์ (Ions) คือ อะตอมหรือกลุ่มอะตอมที่เสียสมดุลทางไฟฟ้า ดังเช่น น้ำบริสุทธิ์จะประกอบด้วยกลุ่มอะตอมที่มีประจุ

บวกคือ H^+ และหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งมีประจุลบ OH^- ที่ปริมาณเท่าๆ กัน ดังนั้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่อาจจะเป็นน้ำธรรมดา น้ำเกลือ กรด ต่าง ที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน ในการที่วงจรไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้ครบสมบูรณ์จะเป็นจะต้องมีขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วบวก (Anode) และ ขั้วลบ (Cathode) และขั้วทั้งสองจะต้องเชื่อมต่อถึงกัน ขั้วไฟฟ้าอาจเป็นโลหะต่างชนิดกัน หรือเป็นส่วนต่างๆ บนโลหะแท่งเดียวกันก็ได้ การต่อเชื่อมระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองอาจมีเนื้อโลหะเป็นสะพาน แต่ในการกัดกร่อนโดยทั่วไปแล้วเกิดจากการที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมาสัมผัสกันโดยตรง การที่กระแสไฟฟ้าจะไหลถ่ายเทระหว่างขั้วไฟฟ้า จำเป็นจะต้องมีค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสอง ซึ่งปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้ในโลหะจะเป็นดังนี้

- โลหะทำปฏิกิริยากับน้ำ

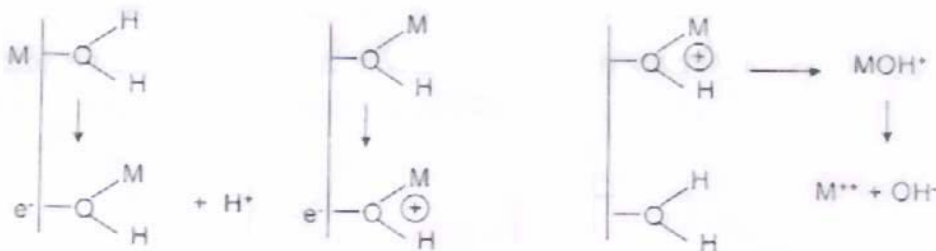
น้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว ดังนั้นจะถูกดูดซับที่ผิวโลหะ จากนั้นน้ำที่ถูกดูดไว้นี้จะเกิดปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน ของโลหะที่ละลายออกมาได้ $MOH + H^+$ ดังรูปที่ 7.9



รูปที่ 7.9 การละลายของโลหะในน้ำ [14]

- โลหะเกิดการกัดกร่อน (Water Corrosion)

เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วโลหะจะละลายออกมาอยู่ในรูป M^{2+} ในสารละลาย (น้ำ) โดยกลไกดังรูปที่ 7.10 คือ MOH จะสูญเสีย e^- อีกตัวกลายเป็น MOH^+ ซึ่งกลุ่มอะตอมนี้จะละลายในน้ำแล้ว แตกตัวเป็น $M^{2+} + OH^-$



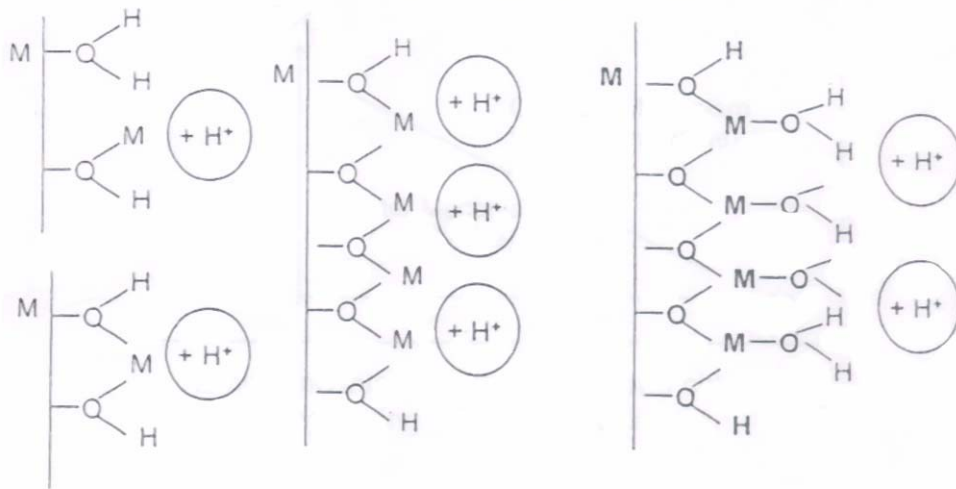
รูปที่ 7.10 การเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนของโลหะ [14]

หากเขียนปฏิกิริยา การกัดกร่อนของเหล็กได้ดังนี้



- โลหะเกิดพาสซีสฟิล์ม (Water Passivation)

จากปฏิกิริยาที่กล่าวมาแล้ว เมื่อน้ำถูกดูดซับไว้ที่ผิวโลหะแล้ว อีออนของโลหะจะละลายออกมาจะถูกจับโดยโมเลกุลของน้ำที่อยู่ผิวโลหะ แล้วเกิดเป็นออกไซด์ของโลหะที่ผิว จากนั้นน้ำจะถูกดูดซับไว้ที่ผิวของออกไซด์ (แทนที่จะถูกดูดซับที่ผิวของโลหะโดยตรง) ดังรูปที่ 7.11



รูปที่ 7.11 การเกิดฟิล์มที่ผิวโลหะโดยน้ำ [14]

- โลหะเกิดการกัดกร่อนเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีคุณสมบัติเป็นกรด

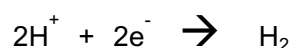
การกัดกร่อนของโลหะที่อยู่ในน้ำที่มีคุณสมบัติเป็นกรดนั้นมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงซึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยา Oxidation และ Reduction

โดยปฏิกิริยา Oxidation ของโลหะจะเกิดขึ้นเป็นขั้วอะโนด ;

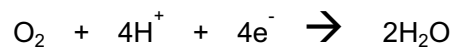


และปฏิกิริยา Reduction จะเกิดที่ขั้วแคโทด โดยทั่วไปจะเป็นดังนี้

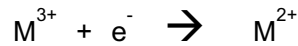
1. มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น



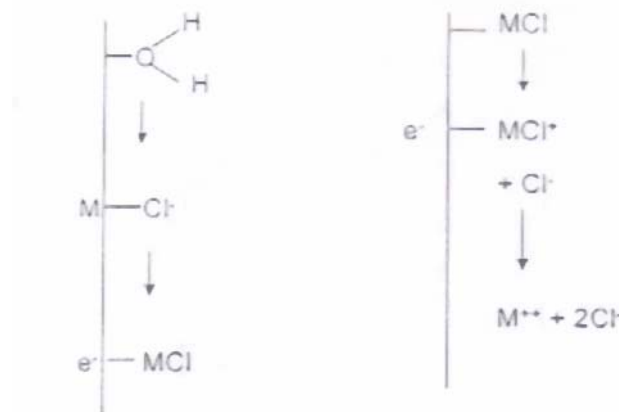
2. เกิด Reduction ของออกซิเจน



3. เกิด Reduction ของไอออนของโลหะ



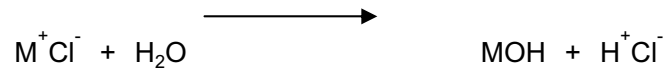
สำหรับการกัดกร่อนเมื่อมีคลอไรด์ร่วมด้วย (Chloride Assisted Corrosion Process) ในกรณีที่น้ำที่มี Cl^- ผสมอยู่เมื่อโลหะสัมผัสกับน้ำ โมเลกุลของ Cl^- จะถูกดูดซับไว้ที่ผิวโลหะแทนที่จะเป็นโมเลกุลน้ำ จากนั้นจะเกิด MCl และทำปฏิกิริยาต่อไปในที่สุดจะได้ $\text{M}^{2+} + 2\text{e}^-$ ดังรูปที่ 7.12 จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยา Reduction แล้วเกิดก๊าซไฮโดรเจนเหมือนกันกับกรณีการกัดกร่อนในน้ำที่มี คุณสมบัติเป็นกรดทั่วไปซึ่งกรณีที่คลอไรด์นี้โลหะจะไม่สามารถสร้างฟิล์มได้อีก สามารถเปรียบเทียบ Cl^- เป็นเหมือนกับปั๊มที่ปั๊ม M^{2+} จากโลหะ เพราะกลไกนี้จะเกิดซ้ำ ๆ กัน และก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้จะเกาะอยู่ตามผิวของวัสดุซึ่งจะนำไปสู่การกัดกร่อนต่อไป



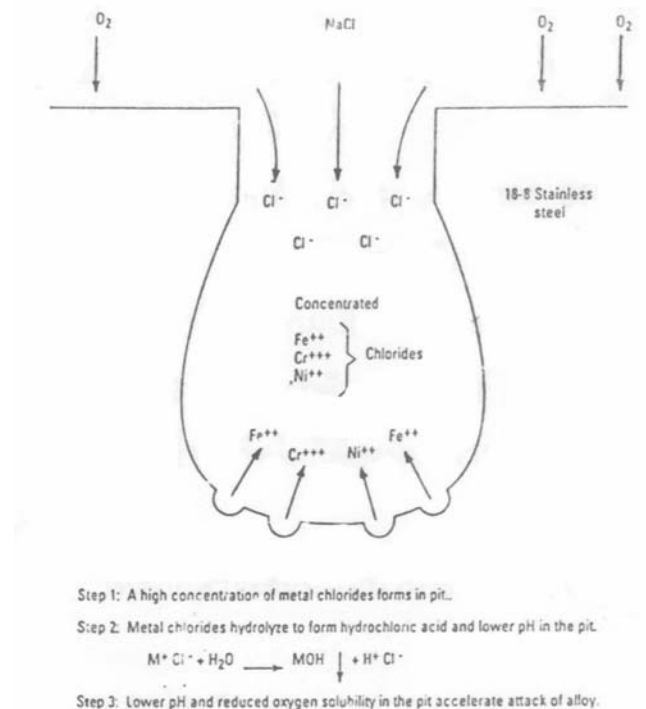
รูปที่ 7.12 คลอไรด์ไอออนในน้ำมีผลต่อการกัดกร่อนของโลหะ [14]

เหล็กกล้าไร้สนิมมักเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting Corrosion) เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม 304 และ 316 เมื่อจุ่มในน้ำทะเลซึ่งมี $\text{pH} = 8$ และมีอัตราการไหลต่ำ จะเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก แม้ว่า 316 จะมีโมลิบดีนัม (Mo) 2 % ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ป้องกันการกัดกร่อนก็ตาม เนื่องจากคลอไรด์จะไปทำลายฟิล์มออกไซด์ที่ปกป้องเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นบริเวณเล็ก ๆ บริเวณนี้จะเป็น อาโนดซึ่งมีพื้นที่เล็กเมื่อเทียบกับพื้นที่คาโทด ซึ่งเป็นบริเวณที่ผิวออกไซด์ยังดีอยู่มีบริเวณกว้างกว่ามาก ดังนั้นปฏิกิริยาการกัดกร่อนจะเกิดที่อาโนดอย่างรุนแรงเป็นหลุมลึกลงไป อาจจะต้องลดความหนาก็ได้ ซึ่งทิศทางของหลุมมักไปตามทิศทางของแรงโน้มถ่วงของโลก นอกจากนี้ยังเป็นที่น่าทึ่งที่การกัดกร่อนแบบหลุมลึกนี้ จะมีการเร่งปฏิกิริยาโดยอัตโนมัติ (Autocatalytic Process) คือเมื่อเกิดเป็นหลุมแล้วภายในหลุมจะเป็นกรดมากขึ้น หรือ pH มีค่าต่ำลง ซึ่งมีขั้นตอนการเกิดดังนี้

ในตอนแรก เมื่อเกิดเป็นหลุมจะมีออกซิเจนของคลอไรด์ในหลุมอยู่มากและออกซิเจนต่ำ ต่อมาคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้กรด



ส่งผลให้ pH ในหลุมต่ำลง การละลายของออกซิเจนต่ำลงด้วย ทำให้เกิดการกัดกร่อนรุนแรงมากขึ้น เหล็กกล้าไร้สนิมจะมีปัญหาการกัดกร่อนแบบครีวิส ซึ่งจะเกิดบริเวณซอกมุมอับ หรือ บริเวณที่มีสารละลายตกค้างอยู่ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีออกซิเจนต่ำ บริเวณนี้จะเป็นแอโนด เมื่อเทียบกับบริเวณอื่นๆ ลักษณะการเกิดคล้ายกับการกัดกร่อนแบบหลุมลึก รูปที่ 7.13 แสดงถึงการกัดกร่อนแบบหลุมลึก



รูปที่ 7.13 การกัดกร่อนแบบหลุมลึกเนื่องจากคลอไรด์ [14]

7.2.3 ลักษณะเฉพาะของการกัดกร่อนแต่ละชนิด

เมื่อผิวหน้าของโลหะประสบกับการสึกกร่อนผุพังลงด้วยอัตราสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวหน้า จะถูกกล่าวว่าวัตถุเกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion) การกัดกร่อนลักษณะนี้มักไม่ค่อยมีปรากฏกับพวกโลหะ ทั้งนี้เพราะยากที่จะหาโลหะที่มีเนื้อเดียวกันตลอดผิวหน้าจึงเป็นผลให้จุดต่างๆ บนผิวหน้าโลหะเกิดการกัดกร่อนไม่เท่ากัน สำหรับตัวอย่างของการกัดกร่อนที่พบมากในโลหะจะเป็นดังนี้

- การกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น (SCC)

ความเค้นเป็นตัวเร่งการกัดกร่อนในบรรยากาศบางแบบ โดยเฉพาะเมื่อโลหะกำลังรับความเค้นจากภายนอกหรือกำลังรับความเค้นแรงดึงภายในหรือภายหลังผ่านงานรีดเย็น การแตกหักอาจเกิดแบบผ่าเกรน หรือแตกตามขอบรอยต่อเกรน หรือเกิดทั้ง 2 แบบพร้อมกัน ขนาดของความเค้นที่จำเป็น และเพียงพอที่จะก่อให้เกิดการแตกหัก ขึ้นกับตัวกลางที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนและโครงสร้างของโลหะพื้น การกัดกร่อนจากความเค้นเป็นรูปแบบของการกัดกร่อนที่มีความสำคัญสูงเพราะสามารถเกิดขึ้นได้ในโลหะหลายชนิด ซึ่งการคงทนต่อการกัดกร่อนจะขึ้นอยู่กับปริมาณของนิเกิลในโลหะนั้นๆ

ปริมาณนิเกิลต่ำสุดที่เหล็กกล้าไร้สนิมยังทนต่อ SCC ได้อยู่ระหว่าง 8 – 12 % ซึ่งเท่ากับปริมาณนิเกิลใน 304 และ 316 ได้มีผลจากการใช้งานของโรงงาน 2 แห่ง ที่ใช้ 304 และ 316 ที่ต้องสัมผัสกับน้ำที่มีคลอไรด์ 40 ppm ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะเกิด SCC เมื่อใช้ไปได้เป็นระยะเวลาปีครึ่งถึงสองปี

จากการสำรวจในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกิดความเสียหายแบบ SCC ทั้งหมดพบว่า [13]

46% ของความเสียหายแบบ SCC จะเกิดที่ pH = 2-6

42% ของความเสียหายแบบ SCC จะเกิดที่ pH = 6-9

11% ของความเสียหายแบบ SCC จะเกิดที่ pH > 9

โดยที่ pH สูง ๆ จะเกิดความเสียหายแบบ SCC ได้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งโดยทั่วไปสารละลายที่มีคลอไรด์จะก่อให้เกิดความเสียหายแบบ SCC ได้บ้างที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเกิดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

เหล็กโดยปกติจะมีโครงสร้างผลึกเป็น bcc หรือเฟอร์ไรต์ แต่เนื่องจากเป็น bcc จะเปราะที่อุณหภูมิต่ำ (แต่จะต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากความเค้นเมื่อมีคลอไรด์ได้ดี) เมื่อเติมโครเมียมลงไป โครงสร้างผลึกไม่เปลี่ยนแปลง แต่ความต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น แต่เมื่อเติมนิเกิล (นิเกิลมีโครงสร้างเป็น fcc) ลงไปมากพอจะทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีโครงสร้างผลึกเป็น fcc หรือ ออสเทนไนต์ซึ่งจะไม่เปราะ มีอุณหภูมิต่ำ คุณสมบัติทางกลดี เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม 304 และ 316 เป็นต้น

- การกัดกร่อนบริเวณรอยแยก (Crevice Corrosion)

ในความหมายทั่วไปการกัดกร่อนชนิดนี้จะรวมถึงการกัดกร่อนผุพังบริเวณรอยต่อของโลหะซึ่งสัมผัสอยู่กับสิ่งแวดล้อมที่ช่วยเสริมการกัดกร่อน เราทราบจากประสบการณ์ว่าการกัดกร่อนมีแนวโน้มจะเกิดบริเวณรอยแยก ซึ่งมีสารละลายตกค้างเป็นเวลานานกว่าจะแห้ง การกัดกร่อนยังสามารถเกิดขึ้นได้ในบริเวณรอยแยกที่จมมิดในสารละลาย ปฏิกิริยาการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้จากความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของกลุ่มออกซิเจนที่สัมผัสชั้นงานบริเวณรอยต่อ ออกซิเจนสามารถเข้าถึงบริเวณด้านนอกของรอยต่อได้ง่าย จึงเกิดขั้วลบ (Cathode) บริเวณนี้บริเวณด้านในของรอยต่อสัมผัสออกซิเจนเบาบาง มีสภาพเป็นขั้วบวก (Anode) ผลผลิตชุดแรกของการกัดกร่อนจะปกปิดบริเวณศูนย์กลางขั้วบวก จนกระทั่งการกัดกร่อนขั้นต่อไปไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ ออกซิเจนจะไม่สามารถ

ทะลุเข้าไปถึงเนื้อโลหะ เกิดบริเวณออกซิเจนเบาบาง ที่นี้ศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นแต่ถ้าปฏิกิริยาเกิดต่อไป การกัดกร่อนแบบหลุมลึกจะเกิดขึ้นที่ขั้วบวก การกัดกร่อนมักเกิดบริเวณที่ออกซิเจนเข้าไม่ถึงเสมอ รอยแยกยังมีผลทำให้เกิดความแตกต่างของปริมาณออกซิเจนของโลหะ ณ จุดต่างๆ ระหว่างรอยเชื่อมต่อ เป็นต้นว่า บริเวณผิวในของรอยประกบจะเกิดออกซิเจนของโลหะความเข้มข้นสูงมากกว่าบริเวณรอบนอก การกัดกร่อนมีแนวโน้มจะเกิดบริเวณออกซิเจนต่ำประสิทธิภาพ คือที่ขอบรอยต่อของจุดเชื่อมทางกล วิธีการที่ดีที่สุดที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดการกัดกร่อนประเภทนี้ คือพยายามอย่าให้มีรอยแยก รอยเชื่อมต่อ โดยการออกแบบชิ้นงานใหม่ หรือ อุดรอยต่อให้พ้นจากการสัมผัสความชื้นหรือบรรยากาศการกัดกร่อน

- การกัดกร่อนเป็นหลุมลึก (Pitting Corrosion)

จากรูปที่ 7.14 เป็นตัวอย่างหนึ่งของการกัดกร่อนแบบไม่สม่ำเสมออันเป็นผลมาจากความไม่เนื้อเดียวกันของโลหะ บางบริเวณเกิดแกนแข็ง บางบริเวณรูปผลึกโครงสร้างภายในบิดเบี้ยว ผลจากการที่โลหะมีเนื้อไม่สม่ำเสมอ ทำให้แต่ละจุดมีศักย์ไฟฟ้าไม่เท่ากัน เกิดการกัดกร่อนเป็นหลุมลึก เฉพาะจุด หลุมของการกัดกร่อนเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยที่ปฏิกิริยาจะเริ่มต้นในบริเวณแคบๆ แล้วค่อยๆ เจาะลึกลงไปข้างในจนเกิดการผุพังเป็นหลุมใหญ่ และ ในที่สุดปากหลุมก็จะเกิดการกัดกร่อนเป็นวงกว้างขึ้น การกัดกร่อนประเภทหลุมลึกบนโลหะพื้นอาจเกิดขึ้นเมื่อผิวเคลือบ (Coating) หรือฟิล์มป้องกัน (Passive Film) เกิดการฉีกขาด หรือ เกิดความเสียหาย

ในทางด้านอุตสาหกรรม การกัดกร่อนประเภทนี้จะทำให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงมากกว่าประเภทอื่นเนื่องจากการเกิดหลุมลึกจะทำให้เนื้อวัสดุมีลักษณะเป็นรูพรุนและเกิดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งวัสดุทะลุได้ซึ่งการที่โลหะทำปฏิกิริยากับตัวกลางต่างชนิดกันก็ให้ผลที่แตกต่างกันซึ่งรายละเอียดจะถูกกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

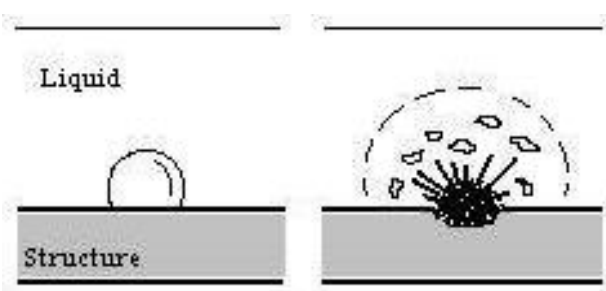


รูปที่ 7.14 การกัดกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting Corrosion)

จากการศึกษาจะพบว่า การกัดกร่อนนั้นมีหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบนั้นก็จะมีเงื่อนไขของกระบวนการเกิดการกัดกร่อนที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเข้าใจถึงปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี หรือกระบวนการพื้นฐานของการเกิดการกัดกร่อนนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อใช้ในการอธิบายกระบวนการ และการเกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในงานวิจัยอย่างมีเหตุผล และมีประสิทธิภาพ

7.3 แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกในกระบวนการกัดกร่อน

แหล่งกำเนิดของสัญญาณ AE ของโลหะภายใต้สภาวะการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น การชนจากการไหลของสารละลายที่ผิวหน้าวัสดุ หรือ สัญญาณทางไฟฟ้าที่เป็นตัวเร่งให้เกิดการกัดกร่อน แต่โดยทั่วไปมีการยอมรับว่าแหล่งกำเนิดจะเกิดจากปรากฏการณ์การแตกของพาสซีฟฟิล์มและการแตกของฟองก๊าซไฮโดรเจน[3] ที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีที่สารละลายกระทำกับผิววัสดุ ซึ่งการแตกของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นใต้ของเหลวบริเวณสัมผัสเนื้อโลหะจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนไหวจากการสั่นสะเทือนบนผิวหน้าระหว่างของเหลวและโลหะ ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนการได้รับแรงกระทำซ้ำ ๆ ก่อให้เกิดความเค้นสูงอันเนื่องมาจากฟองอากาศเกิดขึ้นและระเบิดยุบตัว ผลจากการระเบิดของฟองอากาศก่อให้เกิดความเค้นกระแทกผิวหน้าโลหะ ทำให้อนุภาคโลหะค่อย ๆ เขี่ยหลุดจากบริเวณผิว ซึ่งเป็นการทำให้เกิดการทำลายพาสซีฟฟิล์มของโลหะนั้น ๆ จนเป็นการนำไปสู่การเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก ซึ่งเป็นการกัดกร่อนที่รุนแรงได้



รูปที่ 7.15 การกัดกร่อนจากการสั่นสะเทือนจากการระเบิดของฟอง

ในการศึกษาถึงกระบวนการการถูกทำลายของพาสซีฟฟิล์มเนื่องจากการแตกของฟองอากาศได้อธิบายถึงการเกิดอะคูสติกอิมพัลส์ขึ้นได้ โดยสมมุติให้สัมประสิทธิ์ความตึงของพื้นผิวของสารละลายที่เป็นตัวกลางในการกัดกร่อน(γ) รัศมีของฟองอากาศคือ(R) ดังนั้นความดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงตึงผิวของฟองอากาศ(P) แสดงได้ดังสมการที่ 2 [15]

$$P = 2\gamma/R \quad (2)$$

และแรงกระทำเฉื่อย(F)ที่เกิดขึ้นที่ผิวพาสซีฟฟิล์มของโลหะเนื่องจากฟองอากาศเมื่อพิจารณาส่วนครึ่งบนของฟองอากาศที่เกาะที่ผิววัสดุ คือ[4]

$$F = 2\pi R^2 \quad (3)$$

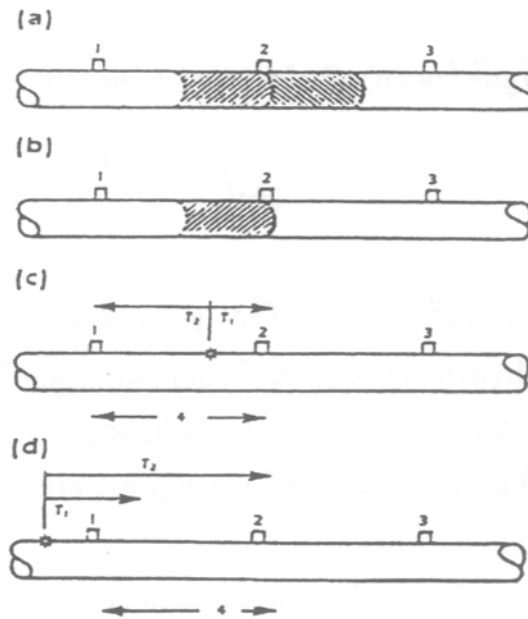
ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นนี้จะผ่านไปสู่ผิวของพาสซีฟฟิล์มและเนื้อวัสดุ เมื่อฟิล์มเกิดการแตก ผิวหน้าของวัสดุจะเกิดการเคลื่อนไหวที่ซับซ้อนมากจากแรงที่กระทำและจะส่งสัญญาณอะคูสติกออกมาทำให้ตรวจจับได้ จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้มาทำการวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งจากการวิเคราะห์นั้นสามารถบอกได้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างเกิดการกักตร้อน กับ ค่าตัวแปรทางอะคูสติกที่เกี่ยวข้องได้ รวมถึงยังสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งของการเกิดการกักตร้อนได้อีกด้วย โดยการวิเคราะห์หาตำแหน่งการกักตร้อนนั้นจะขอกว่าในลำดับต่อไป

7.4 การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดอะคูสติกโดยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน [8,11]

วิธีอะคูสติกอิมิชชันสามารถนำมาใช้ในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดอะคูสติกได้ โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นของการบันทึกช่วงเวลาที่แตกต่างกันของการรับสัญญาณของหัวรับสัญญาณ ในการติดตั้งหัวรับสัญญาณหลายตัว แล้วกำหนดค่าความเร็วของเสียงในตัวกลางที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการคำนวณหาตำแหน่ง ซึ่งปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดจำนวนหัวรับสัญญาณที่ใช้ในการตรวจสอบขึ้นอยู่กับระยะหรือขนาดของพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบ รวมทั้งการลดลงของแอมพลิจูด(Attenuation) เมื่อเสียงเดินทางผ่านตัวกลาง จำนวนหัวรับสัญญาณจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะหรือพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบและตามอัตรา การลดลงของสัญญาณเสียงของวัสดุแต่ละชนิด โดยการหาตำแหน่งโดยวิธีอะคูสติกอิมิชชันนี้แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ

7.4.1 วิธีการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดแบบเส้นตรง (Linear Source Location)

พิจารณาถึงสถานะที่มีหัวตรวจสอบ 3 หัว ติดอยู่บนโครงสร้างที่เป็นเส้นตรง เช่น กรณีของท่อตรงยาว (ดังรูปที่ 7.16) สมมติให้เกิดสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนท่อ ซึ่งส่งผลให้คลื่นความเค้นเดินทางในสองทิศทางโดยที่มีค่าความเร็วคงที่และเท่ากัน หากพิจารณาหัวรับสัญญาณที่มีการรับคลื่นความเค้นอันดับแรก (เรียกว่า first hit) จากรูปที่ 7.16(a) ถ้า first hit เกิดขึ้นที่หัวรับสัญญาณที่ 2 จะได้ว่าแหล่งกำเนิดนั้นอยู่บริเวณตั้งแต่จุดกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างหัวตรวจสอบที่ 1 และ 2 จนถึงจุดกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างหัวตรวจสอบที่ 2 และ 3 โดยพื้นที่นี้จะลดลงถ้ามีการจับสัญญาณลำดับที่ 2 (second hit) เพิ่มขึ้นอีก เช่น ถ้าสัญญาณลำดับที่ 2 นี้อยู่ที่หัวตรวจสอบที่ 1 จะทำให้รู้ว่าแหล่งกำเนิดนั้นอยู่บริเวณตั้งแต่จุดกึ่งกลางของหัวตรวจสอบของหัวตรวจสอบที่ 1 และ 2 จนถึงหัวตรวจสอบที่ 2 ดังแสดงได้ในรูปที่ 7.16 (b)



รูปที่ 7.16 วิธีการหาตำแหน่งแบบเส้นตรง

- (a) บริเวณที่เกิดขึ้นเมื่อหัวตรวจสอบที่ 2 ได้รับสัญญาณลำดับที่ 1
- (b) บริเวณที่เกิดขึ้นเมื่อหัวตรวจสอบที่ 2 ได้รับสัญญาณลำดับที่ 1 และหัวตรวจสอบที่ 1 ได้รับสัญญาณลำดับที่ 1
- (c) ความแตกต่างของเวลา $\Delta t = T_2 - T_1$
- (d) แหล่งกำเนิดอยู่นอกแนวของหัวตรวจสอบ $\Delta t = T_2 - T_1 = \text{ค่าคงที่} \equiv D$

วิธีการนี้เรียกว่าวิธี Zone Source Location โดยสัญญาณที่ได้รับนั้นจะเป็นเพียงแต่แสดงบริเวณ (zone) แทนที่จะเป็นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่น แต่ถ้าสามารถวัดค่าเวลาที่แตกต่างของการวัดได้ (ตามที่แสดงในรูปที่ 7.16(c)) ก็จะทำให้สามารถหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่นที่ถูกต้องได้ ถ้าค่าความแตกต่างทางเวลาของสัญญาณที่ตรวจจับได้จาก หัวตรวจสอบที่ 1 และ 2 เป็นศูนย์ จะสามารถบอกได้ว่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่นนั้นอยู่ที่จุดกึ่งกลางของระยะห่างของหัวรับตรวจสอบทั้งสอง หรือ ถ้ากรณีที่ลำดับการรับสัญญาณคือ หัวตรวจสอบที่ 1 จากนั้นเป็นหัวตรวจสอบที่ 2 ค่าความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการเดินทางระหว่างสองหัวตรวจสอบจะเป็น

$$\Delta t = \frac{D}{V} \quad (4)$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณ (d) จะเป็น

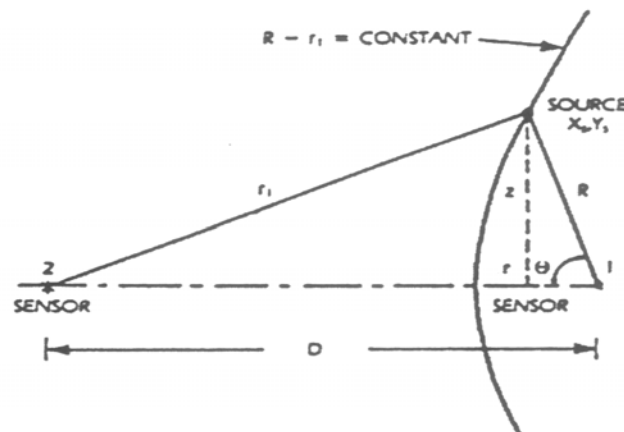
$$d = \frac{(D - v\Delta t)}{2} \quad (5)$$

โดยที่ D = ระยะทางระหว่างหัวรับสัญญาณ
 d = ระยะจากรอยบกพร่องถึงหัวรับสัญญาณอ้างอิง
 v = ความเร็วเสียงในชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบ
 Δt = ช่วงเวลาที่แตกต่างกันของการรับสัญญาณของหัวรับสัญญาณ

เมื่อระยะ d จะวัดจากหัวตรวจสอบที่ได้รับสัญญาณลำดับที่ 1 ก่อนและถ้าแหล่งกำเนิดของสัญญาณอะคูสติกอยู่นอกแนวของหัวตรวจสอบ ตามรูปที่ 7.16(d) ความแตกต่างทางเวลาของสัญญาณระหว่างหัวตรวจสอบทั้งสองจะคงที่ ซึ่งเป็นการระบุได้ว่าแหล่งกำเนิดคลื่นสัญญาณอยู่นอกบริเวณระหว่างหัวตรวจสอบทั้งสอง วิธีการของการหาตำแหน่งแบบเส้นตรง (Linear Location) นั้นเหมาะสมกับกรณีที่ระยะห่างของหัวตรวจสอบมีค่ามากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งหากไม่เป็นไปตามเงื่อนไขนี้การระบุตำแหน่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้

7.4.2 วิธีการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแบบระนาบ 2 มิติ (Location of Source in Two Dimensions)

พิจารณาให้หัวตรวจสอบ 2 หัว วางอยู่บนระนาบขอบเขตอนันต์ โดยจะสมมติให้เป็นไปตามทฤษฎี คือ คลื่นที่เกิดจากความเค้นจะเดินทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติก ด้วยความเร็วที่คงที่ในทุกทิศทางดังรูปที่ 7.17



รูปที่ 7.17 การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดบนระนาบ 2 มิติ

จากรูปที่ 17 จะได้

$$V\Delta t = r_1 - R$$

และ

$$Z = R \sin \theta$$

$$Z^2 = r_1^2 - (D - R \cos \theta)^2$$

ดังนั้น

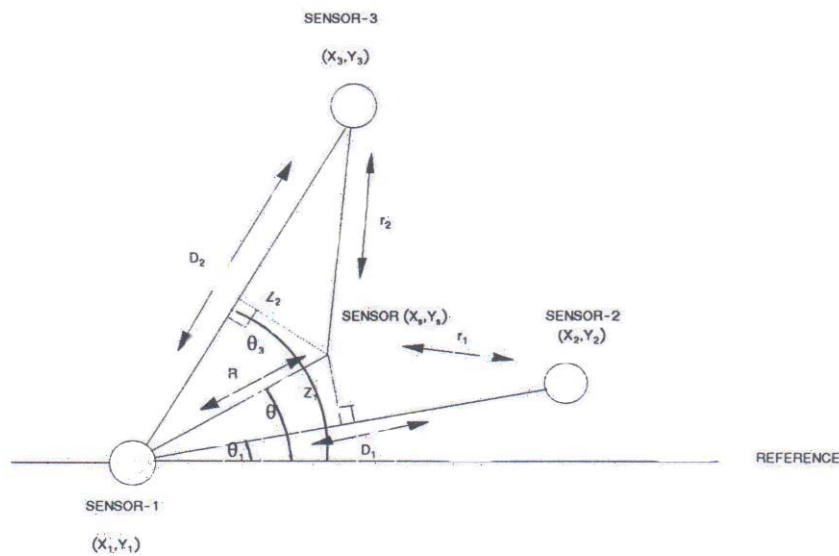
$$R^2 \sin^2 \theta = r_1^2 - (D - R \cos \theta)^2$$

$$R^2 = r_1^2 - D^2 + 2DR \cos \theta$$

ซึ่งจะได้

$$R = \frac{1}{2} \frac{D^2 - V^2 \Delta t_1^2}{V \Delta t + D \cos(\theta - \theta_1)} \quad (6)$$

สมการที่ (6) เป็นสมการของเส้นไฮเพอร์โบลาที่ผ่านแหล่งกำเนิดคลื่นจุด (x,y) โดยทุกๆ จุดบนเส้นไฮเพอร์โบลานี้จะให้ข้อมูลที่ตรงต่อข้อมูลเริ่มต้น (ซึ่งได้แก่ลำดับของสัญญาณและค่าความแตกต่างของเวลา) ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.17 จะมีประสิทธิภาพที่ไม่เพียงพอสำหรับที่จะนำมาทำการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดคลื่นในระบบ 2 มิติได้ ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลที่ดีขึ้น จึงได้มีการเพิ่มจำนวน หัวตรวจสอบอีก 1 หัว ตามรูปที่ 7.18 โดยทำให้สัญญาณที่ตรวจจับได้มีลำดับของสัญญาณ 3 ลำดับ และค่าความแตกต่างทางเวลาอีก 2 ค่า (ค่าความแตกต่างระหว่างสัญญาณลำดับที่ 1 กับ 2 และค่าความแตกต่างทางเวลาระหว่างสัญญาณลำดับที่ 1 กับ 3)



รูปที่ 7.18 การวางหัวตรวจสอบ 3 หัว และมีลำดับของสัญญาณ คือ 1,2 และ 3

ซึ่งจะได้เป็น

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_1^2 - v^2 \Delta t_1^2}{v \Delta t_1 + D_1 \cos(\theta - \theta_1)} \quad (7)$$

และ

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_2^2 - v^2 \Delta t_2^2}{v \Delta t_2 + D_2 \cos(\theta_3 - \theta)} \quad (8)$$

โดยที่ R = ระยะจากแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงถึงหัวรับสัญญาณที่ 1 (หัวรับสัญญาณอ้างอิง)

θ = มุมของเส้นที่ลากจากหัวรับสัญญาณที่ 1 ไปยังแหล่งกำเนิดอะคูสติก ทำกับแกนอ้างอิง

θ_1 = มุมของเส้นที่ลากจากหัวรับสัญญาณที่ 1 ไปยังหัวรับสัญญาณที่ 2 ทำกับแกนอ้างอิง

θ_2 = มุมของเส้นที่ลากจากหัวรับสัญญาณที่ 1 ไปยังหัวรับสัญญาณที่ 3 ทำกับแกนอ้างอิง

Δt_1 = ช่วงเวลาที่แตกต่างกันของการรับสัญญาณของหัวรับสัญญาณที่ 1 และ 2 (วินาที)

Δt_2 = ช่วงเวลาที่แตกต่างกันของการรับสัญญาณของหัวรับสัญญาณที่ 1 และ 3 (วินาที)

D_1 = ระยะทางระหว่างหัวรับสัญญาณที่ 1 และ 2 (มม.)

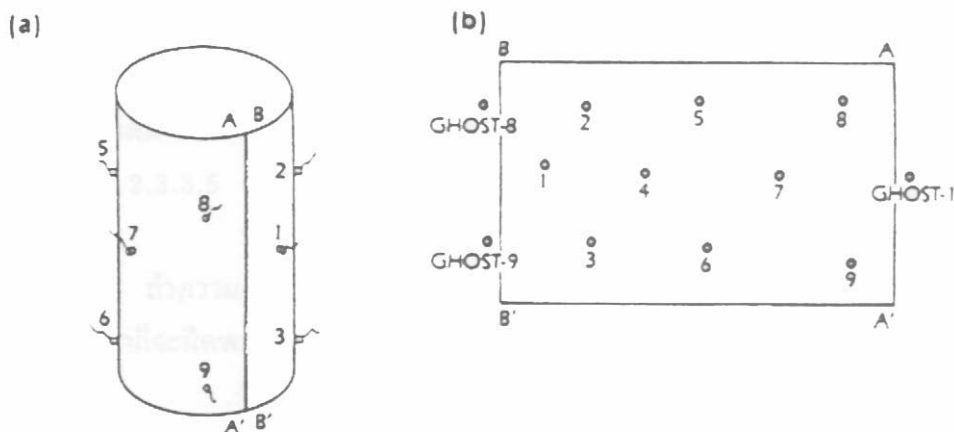
D_2 = ระยะทางระหว่างหัวรับสัญญาณที่ 1 และ 3 (มม.)

V = ความเร็วของเสียงในชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบ (มม. / วินาที)

ซึ่งเมื่อทำการแก้สมการที่ (7) และ (8) จะทำให้ได้ตำแหน่งแหล่งกำเนิดคลื่นในระบบ 2 มิติ ตามภาพที่แสดงในรูปที่ 14 ซึ่งเป็นการแสดงการวางตำแหน่งของ หัวตรวจสอบเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า แต่ในสมการที่ (7) และ (8) ยังสามารถใช้กับกรณีอื่นๆ ได้อีกด้วย

7.4.3 แบบระนาบของผิวทรงกระบอก

คือการหาตำแหน่งที่อยู่ในระนาบของผิวทรงกระบอก เหมาะสมกับงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีความหนาไม่มากนักดังรูปที่ 7.19 เช่น ภาชนะรับแรงดัน หรืออาจจะประยุกต์ใช้กับงานที่มีลักษณะเป็นทรงกลมได้ การติดตั้งหัวตรวจสอบสัญญาณและการคำนวณหาตำแหน่งเหมือนกันกับแบบระนาบจะต่างกันเพียงต้องกำหนดคำว่า Wrap ลงในโปรแกรมด้วย



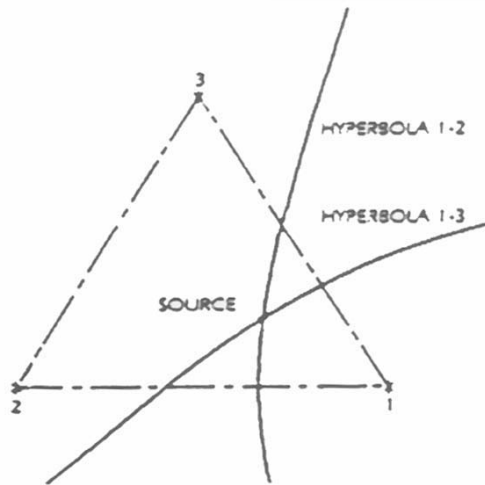
รูปที่ 7.19 การหาตำแหน่งแบบระนาบของผิวทรงกระบอก

• การกำหนดบริเวณที่มีประสิทธิภาพ

โดยทั่วไปแล้ววิธีการแก้ปัญหาในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่นโดยใช้สมการที่ 7 และรูป ซึ่งจะใช้ได้เฉพาะกับพื้นที่ผิวซึ่งมีหัวตรวจสอบติดตั้ง 3 หัว ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการใช้งาน โดยปกติแล้วพื้นที่ที่สนใจในการตรวจสอบจริงจะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับพื้นที่ทั้งหมด เช่น รอยเชื่อม หรือลักษณะของผิวที่หยาบหรือละเอียด

การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่นเป็นกระบวนการการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องได้แก่ โครงสร้างการเรียงตัวของหัวตรวจสอบ ซึ่งมีผลอย่างมากในการคำนวณหา

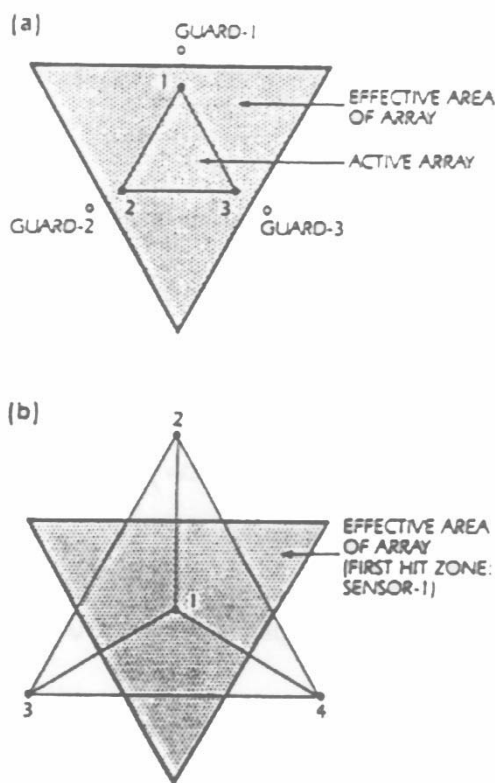
แหล่งกำเนิด ข้อผิดพลาดดังกล่าวสามารถหลีกเลี่ยงได้ โดยการกำหนดบริเวณพื้นที่ประสิทธิภาพให้กับหัวตรวจสอบดังรูปที่ 7.20



รูปที่ 7.20 การหาแหล่งกำเนิดโดยใช้จุดตัดของเส้นไฮเปอร์โบลา

ในรูปที่ 7.20 เป็นเทคนิคของการใช้สัญญาณลำดับที่ 1 ร่วมกับหัวตรวจสอบแบบการ์ด (Guard) โดยจะมีหัวตรวจสอบที่เรียกว่า แอคทีฟ (Active) วางคู่กับหัวตรวจสอบอีกตัวหนึ่งที่เรียกว่า การ์ด (Guard) ถ้าสัญญาณอะคูสติกถูกตรวจจับได้ หัวตรวจสอบที่สามารถรับสัญญาณเป็นหัวแรกจะทำหน้าที่เป็นหัวรับสัญญาณแบบการ์ด จากนั้นสัญญาณนั้นก็จะถูกตีกลับโดยไม่นำไปคำนวณในขั้นตอนการคำนวณ โดยที่สัญญาณลำดับที่ 1 ของหัวรับสัญญาณแบบแอคทีฟ จะได้รับการคำนวณแทน ทั้งนี้ให้ถือว่า หัวตรวจสอบแบบการ์ดจะทำหน้าที่เพียงปฏิเสธข้อมูล โดยจะไม่มีส่วนร่วมในการทำหน้าที่วัด หรือคำนวณแต่อย่างใด ซึ่งพื้นที่ที่เป็นพื้นที่ทำงานจะถูกจำกัดให้อยู่ในบริเวณที่แรงเท่ากัน

ในรูปที่ 7.21 เป็นเทคนิคของการใช้งานร่วมกันระหว่าง บริเวณ (zone) กับค่าความแตกต่างทางเวลา (Δt) โดยพื้นที่ที่ประสิทธิภาพจะถูกจำกัดให้ตีกลับสัญญาณอะคูสติกทั้งหมดจะกว่าหัวรับสัญญาณตรงกลางจะได้รับสัญญาณลำดับที่ 1 เมื่อพื้นที่ที่เป็นบริเวณการทำงานจะแสดงด้วยพื้นที่แรงในภาพ ในกรณีนี้จะไม่มีการแบ่งหัวตรวจสอบเป็นแบบแอคทีฟหรือแบบการ์ด แต่หัวตรวจสอบจะทำงานร่วมกันตามแต่ความเหมาะสมในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติก



รูปที่ 7.21 วิธีการจำกัดพื้นที่เพื่อหาตำแหน่งอย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีที่ใช้การตรวจจับสัญญาณลำดับที่ 1 กับหัวตรวจสอบแบบการ์ดจะให้ประสิทธิภาพสูงการทำงานด้านการทดสอบไม่ทำลาย ซึ่งจะต้องอาศัยหัวตรวจสอบที่มีความไว (Sensitivity) ที่เหมาะสมกับหัวตรวจสอบแอดทิฟ ซึ่งในการสร้างสัญญาณเพื่อทดสอบประสิทธิภาพอาจทำได้โดยใช้วิธีการหักไส้ดินสอ (Lead Break)

8. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (literature review)

แม้ว่าในปัจจุบันนี้จะมีวิธีการตรวจสอบการเกิดการกัดกร่อน และความเสียหายจากการกัดกร่อนในหลายรูปแบบก็ตาม แต่วิธีการตรวจสอบดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องมีการหยุดกระบวนการผลิตเพื่อเตรียมการก่อนการตรวจสอบ หรือ ปัญหาในการเข้าถึงตำแหน่ง หรือบริเวณที่ต้องการตรวจสอบ เช่น การตรวจสอบการกัดกร่อนที่บริเวณภายในกันถังบรรจุ จำเป็นที่จะต้องมีการถ่ายสารบรรจุออกเสียก่อนเพื่อให้สามารถตรวจสอบได้ ณ บริเวณที่เกิดการกัดกร่อนนั้น วิธีอะคูสติกอิมิชั่นเป็นวิธีการตรวจจับคลื่นเสียงอัลตราซาวด์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง ไม่ว่าจะเป็น การตรวจสอบโครงสร้างรับแรงในอุตสาหกรรมการบิน การวิเคราะห์ทางวัสดุ (การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ กระบวนการเกิดการแตกหัก และลักษณะของการพังทลาย) [1] การตรวจสอบและการประกันคุณภาพโดยการเฝ้าระวังขณะทำการผลิต การตรวจสอบการรั่วของท่อ [2] หรือถึงพิกขนาดใหญ่แบบระบบเวลาจริง [2,3,4,5,6,7] เป็นต้น ซึ่งข้อได้เปรียบของวิธีการนี้คือ ไม่จำเป็นที่จะต้องมีการหยุดระบบการผลิตทั้งหมด การตรวจสอบสามารถกระทำได้แม้ว่าระบบการผลิตยังดำเนินการอยู่ หรือ อาจจะมีการหยุดระบบการผลิตเพียงบางส่วนเท่านั้น

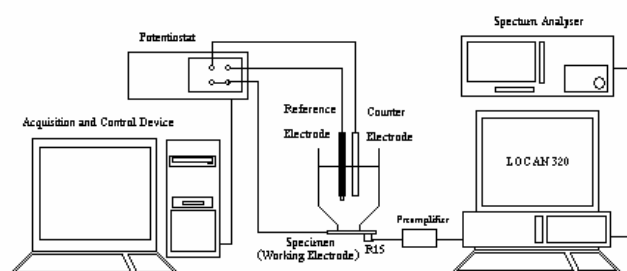
เนื่องจากเป็นระบบการตรวจสอบแบบเวลาจริง (Real-time) ดังนั้นจึงเป็นการลดค่าใช้จ่ายสำหรับการเตรียมการเพื่อการตรวจสอบสำหรับวิธีการตรวจสอบแบบอื่นๆ

การตรวจจับการกัดกร่อนด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ชันก็เป็นการประยุกต์อีกรูปแบบหนึ่ง ที่มีการศึกษาและวิจัยเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก [8,9] เนื่องจากการกัดกร่อนเป็นปัญหาที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในทางอุตสาหกรรม และนำไปสู่การสูญเสียค่าใช้จ่ายจากผลของการกัดกร่อนดังกล่าว ซึ่งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นนั้นมีหลายรูปแบบที่ก่อให้เกิดความเสียหายทางอุตสาหกรรม โดยที่ได้มีการศึกษาและวิจัยคือ การกัดกร่อนแบบยูนิฟอร์ม และการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ (localized corrosion) ในรูปแบบต่างๆ โดยรูปแบบของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมการกัดกร่อน และชนิดของวัสดุที่เกิดการกัดกร่อน รวมถึงปัจจัยประกอบอื่นๆ ซึ่งในแต่ละงานวิจัยที่ผ่านมาจะมีวิธีการศึกษาการกัดกร่อนในรูปแบบต่างกันโดยเป็นทั้งการวิจัยการกัดกร่อนแบบ passive [10-14] และ active [15-31] หรือทั้งสองรูปแบบ [32-34] โดยมีการนำพารามิเตอร์ต่างๆ ทางอะคูสติก (Count, Amplitude, Rise time, Duration time, Hits, Energy) สำหรับการวิเคราะห์แสดงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทางอะคูสติกกับกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ โดยการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกกับการกัดกร่อนโดยการแช่ในสารกัดกร่อนและการศึกษาด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีในแต่ละงานวิจัยจะมีความเห็นที่แตกต่างกันไป ซึ่งมีประเด็นของแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกเป็นประเด็นที่สำคัญ เนื่องจากว่าในกระบวนการกัดกร่อนที่แตกต่างกัน แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกจึงมีความแตกต่างกันไป จึงมีกลุ่มของความคิดเห็นแบ่งออกเป็นสามกลุ่มนั้นคือ 1. มาจากกระบวนการของการกัดกร่อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิด pitting และการแตกของ passive film บนผิววัสดุทดสอบ [18-21] หรือ ความเสียหายจากกระบวนการกัดกร่อน [22-30] 2. มาจากแรงที่เกิดจากฟองก๊าซที่เป็น product ในขั้นตอนของการเกิดการกัดกร่อนมีการแตกตัวที่บริเวณผิวหรือใกล้กับผิววัสดุ หรือการสั่นสะเทือนจากการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซในสารกัดกร่อน [12,17,34] และ 3. อาจจะมาจากการทั้งสองกระบวนการ กล่าวคือสัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับได้นั้นมีแหล่งกำเนิดมาจากทั้งจากฟองก๊าซ และการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเนื่องจากการกัดกร่อน [10,13,14,15,16,32,33]

จากข้อความที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะพบว่าในต่างประเทศได้มีการนำเอา AE มาใช้ตรวจจับการกัดกร่อนแล้ว แต่ยังไม่มีการศึกษาอย่างชัดเจนว่าแหล่งกำเนิดเสียงมาจากกลไกหรือปฏิกิริยาใด เป็นผลทำให้การแบ่งระดับความรุนแรงออกเป็นระดับต่างๆ มีความถูกต้องอยู่ในระดับหนึ่งเท่านั้น โดยความคลาดเคลื่อนจะมีอยู่สูงในระดับการกัดกร่อนระดับปานกลาง และมีความถูกต้องในกรณีที่มีการกัดกร่อนน้อยและในระดับสูงมาก ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาแหล่งกำเนิดเสียงที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting) และแบบยูนิฟอร์ม (Uniform) โดยวัสดุที่จะทำการศึกษาได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำถังพักและวัสดุโครงสร้าง นอกจากนั้นจะทำการศึกษาและพัฒนาเทคนิคในการแบ่งแยกข้อมูลซึ่งเป็นงานวิจัยที่ไม่ค่อยมีผู้ตีพิมพ์ผลงานมากนัก ให้มีความแม่นยำมากขึ้นและมีข้อจำกัดน้อยลง หลังจากนั้นจะทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราการกัดกร่อนเช่นการเปลี่ยนแปลงปริมาณซัลเฟต หรือความเป็นกรดของสารละลายเพื่อพิจารณาผลกระทบต่อสัญญาณ AE ว่าถ้านำไปใช้กับอุตสาหกรรมซึ่งใช้ถังบรรจุน้ำมันหลายชนิด จะมีผลกระทบต่อสัญญาณ AE หรือไม่อย่างไร

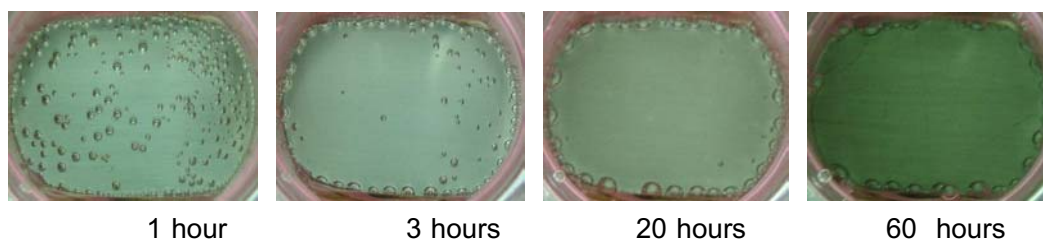
9. สรุปผลการดำเนินงานของโครงการ

9.1 ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ AE กับอัตราการกัดกร่อนในวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม ได้ใช้วัสดุชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ขนาดความหนา 1 มม. มาออกแบบการทดลองเร่งให้เกิดการกัดกร่อนชนิดแบบหลุมลึก (pitting corrosion) ในระยะเวลาอันรวดเร็ว ทั้งแบบที่ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ (NaCl 30 %) และใช้โซเดียมคลอไรด์อย่างอ่อน (NaCl 3 %) พร้อมทั้งเร่งด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี หลังจากนั้นเก็บข้อมูลสัญญาณ AE เพื่อหาความสัมพันธ์กับการเกิดการกัดกร่อน จากผลการทดลองในเบื้องต้นพบว่า AE parameter เช่น Hit , Energy และ Amplitude มีความสัมพันธ์กับอัตราการกัดกร่อน

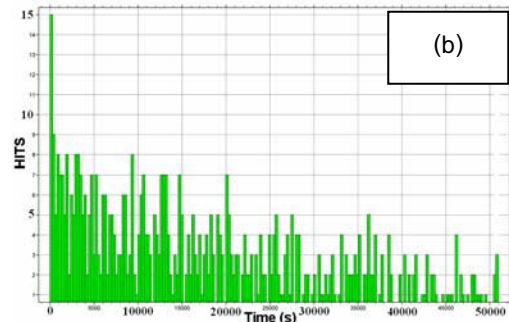
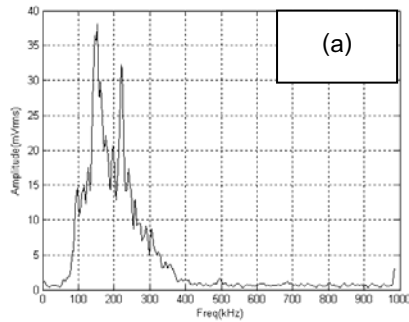


รูปที่ 9.1 แสดงระบบการทดลองการเร่งการกัดกร่อนในวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม

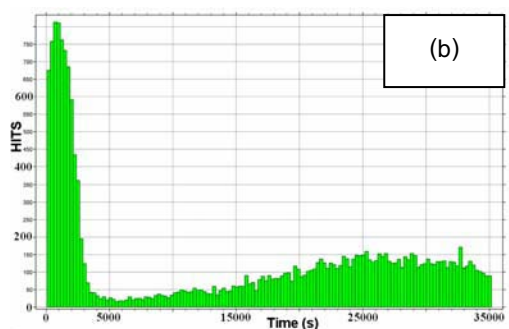
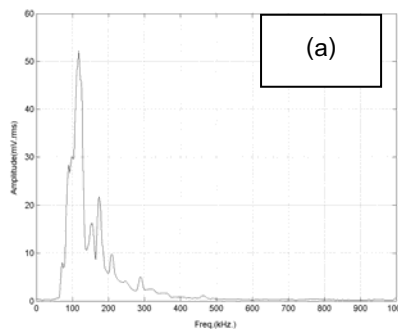
รูปของฟองแก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการใช้ NaCl 30% ณ. เวลาต่าง ๆ กันดังแสดงในรูปที่ 9.2 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติคพารามิเตอร์ ซึ่งได้แก่แอมพลิจูดกับความถี่ที่เกิดในโดเมนความถี่ในรูปที่ 9.3 a และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติคพารามิเตอร์ซึ่งได้แก่อิทธิพลกับความถี่ที่เกิดในโดเมนเวลา ในรูปที่ 9.3 b



รูปที่ 9.2 ฟองแก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการใช้ NaCl 30% pH=1



(a) ความสัมพันธ์ในโดเมนความถี่ (b) ความสัมพันธ์ในโดเมนเวลา
รูปที่ 9.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์ในโดเมนความถี่และโดเมนเวลา
เมื่อใช้ 30%NaCl



(a) ความสัมพันธ์ในโดเมนความถี่ (b) ความสัมพันธ์ในโดเมนเวลา
รูปที่ 9.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์ในโดเมนความถี่และโดเมนเวลา
เมื่อใช้ 3%NaCl

รายละเอียดของผลการทดลอง ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก. และ ภาคผนวก ข. บทความเรื่อง “Identification of AE Source in Corrosion Process” และ “ผลของการถ่ายเทประจุทางไฟฟ้าเคมีต่อสัญญาณอะคูสติกในการตรวจจับการกัดกร่อนด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์” ตามลำดับ

9.2 ศึกษาแหล่งกำเนิดเสียง AE จากปฏิกิริยาการกัดกร่อน

ในส่วนของการหาแหล่งกำเนิดคลื่นเสียง ได้ใช้การทดลองในหัวข้อที่ 9.1 มาวิเคราะห์หาสัญญาณ เพื่อหาต้นกำเนิดของเสียง โดยวิเคราะห์อะคูสติกพารามิเตอร์เทียบกับกลไกการเกิดกระบวนการกัดกร่อนรวมถึงการสังเกตจากการทดลอง จากผลการวิจัยสรุปได้ว่า การทดลองที่ใช้ NaCl เข้มข้นเป็นตัวเร่งการกัดกร่อน แหล่งกำเนิดเสียง ได้แก่ ฟองอากาศ และการแตกของ Passive film ส่วนที่ใช้แบบเร่งด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีแหล่งกำเนิดเสียงมาจากการแตกของ Passive film และจาก pitting corrosion เอง

รายละเอียดของผลการทดลอง ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก. และ ภาคผนวก ข. บทความเรื่อง “Identification of AE Source in Corrosion Process” และ “ผลของการถ่ายเทประจุทางไฟฟ้าเคมีต่อสัญญาณอะคูสติกในการตรวจจับการกัดกร่อนด้วยวิธีอะคูสติกอิมมิชชัน” ตามลำดับ

9.3 การแยกแยะข้อมูล เพื่อแบ่งกลุ่มของความรุนแรงของการกัดกร่อน

ได้ใช้ข้อมูลในชุดของการทดลองใช้โซเดียมคลอไรด์อย่างอ่อน (NaCl 3 %) พร้อมทั้งเร่งด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี มาวิเคราะห์หาเทคนิคการแบ่งแยกความรุนแรงของการกัดกร่อน โดยแบ่งตามความลึกของการกัดกร่อนของวัสดุทดลองออกเป็น 5 ระดับ ได้ใช้วิธีการแบ่งแยกโดยใช้หลักการ Semi-parametric ซึ่งได้แก่ Maximum A Posteriori (MAP) และ Maximum Likelihood (ML) classifiers เทียบกับวิธีที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไปคือ Feed-Forward Neural Network (FFNN) และ Probabilistic Neural Network (PNN) จากนั้นนำวิธีการต่าง ๆ ไปทำนายอัตราการกัดกร่อน ซึ่งผลของความถูกต้องในการทำนายดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงผลของความถูกต้องในการทำนายความรุนแรงของการกัดกร่อน

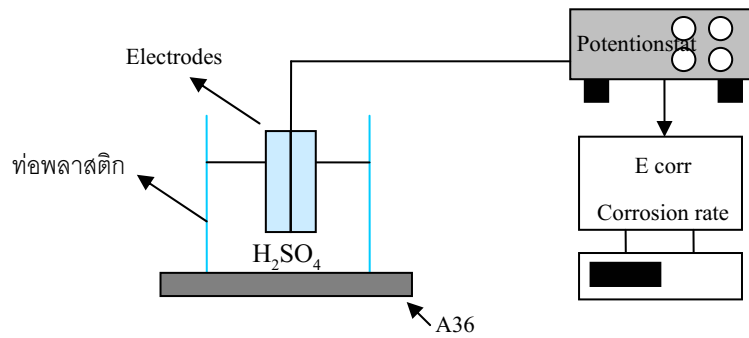
Classifier	Correctly Classified Result [%]			
	Min	Max	Avg	Var
MAP	98.97	99.74	99.26	0.010
ML	98.68	99.52	99.03	0.014
FFNN [6]	84.73	98.85	90.65	3.115
PNN [7]	89.62	99.13	97.33	1.418

จากงานวิจัยพบว่าวิธีการวิเคราะห์โดยใช้หลักการ Semi-parametric สามารถแบ่งแยกความรุนแรงของการกัดกร่อน ออกเป็น 5 ระดับ ได้แม่นยำกว่าวิธีอื่น

รายละเอียดของผลการทดลอง ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ค. บทความเรื่อง “Semi-Parametric Learning for Classification of Pitting Corrosion Detected by Acoustic Emission”

9.4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ AE กับอัตราการกัดกร่อนและกับความเข้มข้น (pH) ของสารละลายในวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน

ทดลองใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด A 36 เพื่อให้ทำให้เกิดอัตราการกัดกร่อนต่างๆ เริ่มการทดลองโดยการหาค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อนดังการทดลองแสดงในรูปที่ 9.5 ค่าของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมดังแสดงตารางที่ 2

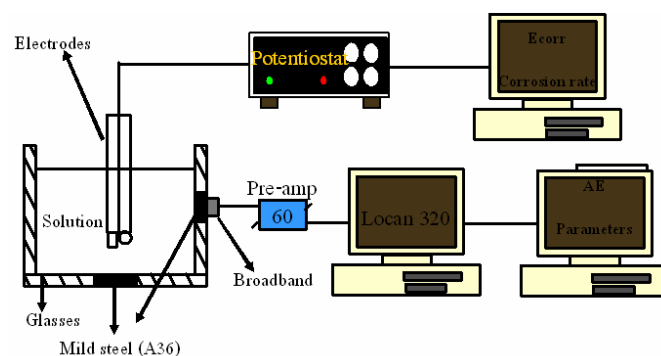


รูปที่ 9.5 การทดลองหาค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อน

ตารางที่ 2. ผลการทดลองหาค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน จากการกัดกร่อนบนวัสดุทดสอบ

ผลการทดลองหาค่า E corr I corr และ Corrosion rate ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับกรด H ₂ SO ₄			
pH	E corr(Volts)	I corr(amp/cm ²)	Corrosion rate(mm / year)
pH 4.5	-0.47577	3.64E-05	0.0625
pH 5	-0.5613	1.15E-05	0.0504
pH 5.5	-0.43673	8.66 E-06	0.0432
pH 6	-0.48579	1.27E-06	0.0292
Weldment pH 5	-0.47319	5.17E-05	0.06

จากนั้นทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอะคูสติคมิชชันกับการกัดกร่อนในระดับอัตราการกัดกร่อนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 9.6



รูปที่ 9.6 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอะคูสติคมิชชันกับการกัดกร่อนในระดับต่าง ๆ

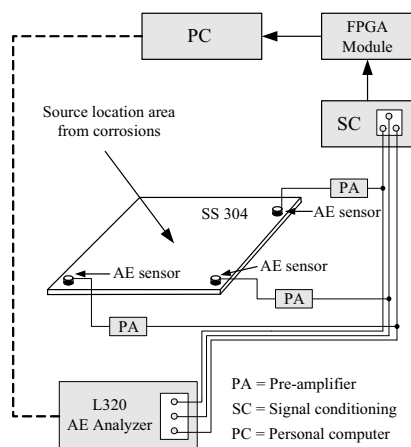
จากผลการทดลองสามารถสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ได้ในระดับความเชื่อมั่นมากกว่า 90% ได้ดังนี้

$$\text{จำนวนสัญญาณอะคูสติก"อิตรวม"} = 6.0 (\text{อัตราการกัดกร่อน})^2 - 38.5(\text{อัตราการกัดกร่อน}) + 62.5$$

รายละเอียดของผลการทดลอง ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ง. และ ภาคผนวก จ. บทความเรื่อง “Effect of Sulfuric Acid Concentration on Acoustic Emission Signals Obtained from Uniform-Corrosion” และบทความเรื่อง “การตรวจจับการกัดกร่อนแบบยูนิฟอร์มในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและรอยเชื่อมด้วยวิธีอะคูสติกอิมมิชชัน”

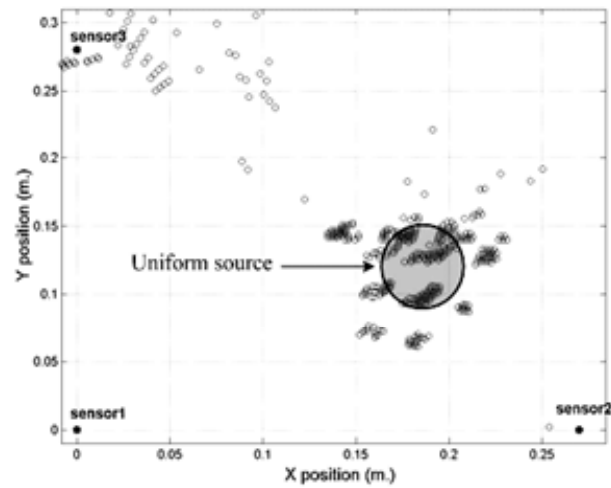
9.5 การสร้างระบบการหาตำแหน่งการกัดกร่อน

ได้สร้างระบบการวิเคราะห์หาตำแหน่งการกัดกร่อนโดยอาศัย Field Programmable Gate Array (FPGA) และออกแบบการทดลองทดสอบระบบกับการกัดกร่อน 4 ชนิดคือ crevice, pitting uniform และ stress corrosion cracking การทดลองดังแสดงในรูปที่ 9.7

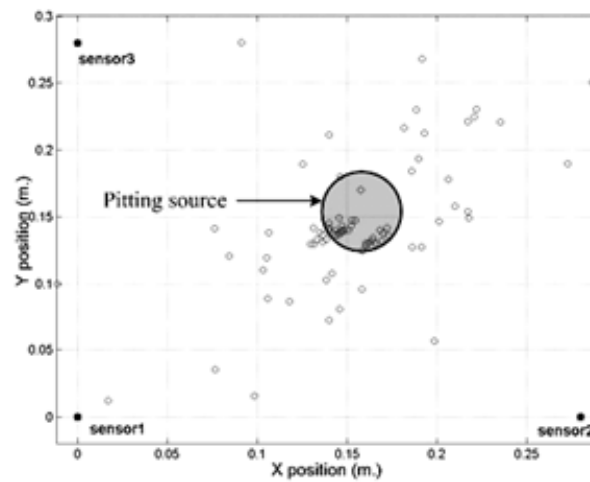


รูปที่ 9.7 การใช้ระบบ FPGA ในการทดลองวิเคราะห์ความถูกต้องของการคำนวณหาตำแหน่ง

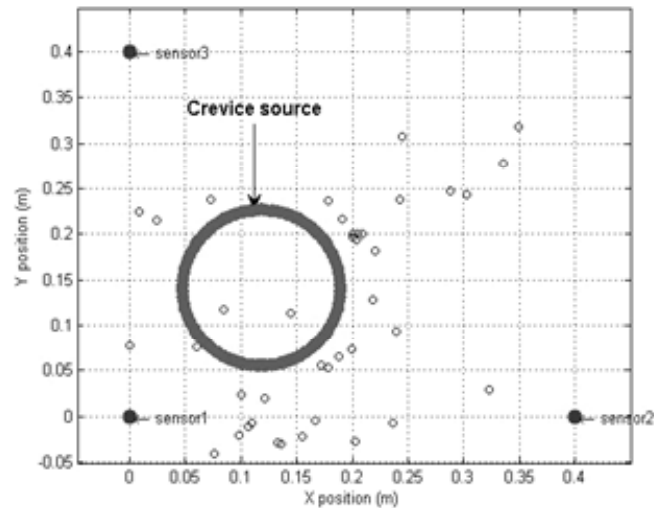
ผลแสดงเปรียบเทียบตำแหน่งการกัดกร่อนจริงกับตำแหน่งการกัดกร่อนที่หาได้ดังแสดงในรูปที่ 9.8 ถึง 9.11



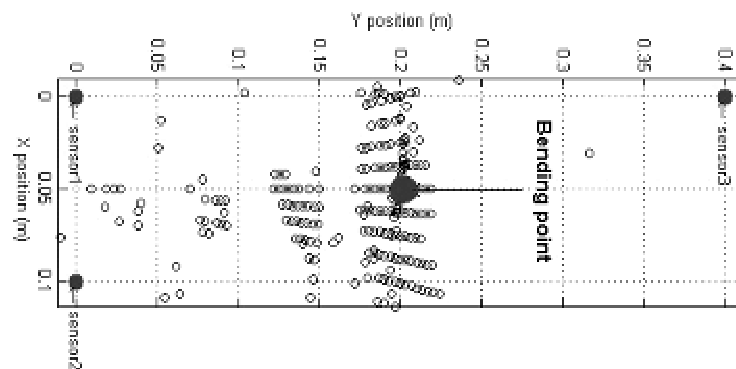
รูปที่ 9.8 เปรียบเทียบตำแหน่งการก่กร่อนแบบ uniform ที่เกิดขึ้นจริง (ในวงกลม) กับตำแหน่งที่คำนวณได้



รูปที่ 9.9 เปรียบเทียบตำแหน่งการก่กร่อนแบบ pitting ที่เกิดขึ้นจริง (ในวงกลม) กับตำแหน่งที่คำนวณได้



รูปที่ 9.10 เปรียบเทียบตำแหน่งการกัดกร่อนแบบ crevice ที่เกิดขึ้นจริง (ในวงกลม) กับตำแหน่งที่คำนวณได้



รูปที่ 9.11 เปรียบเทียบตำแหน่งการกัดกร่อนแบบ SCC ที่เกิดขึ้นจริง (ในแนวเส้นตรง) กับตำแหน่งที่คำนวณได้

รายละเอียดของผลการทดลองดังแสดงไว้ในภาคผนวก จ.บทความเรื่อง “A Study on Source Location Using an Acoustic Emission System for Various Corrosion Types”

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] Miinshiou Huang, Liang Jiang, Peter K. Liaw, Charlie R. Brooks, Rodger Seeley, and Dwaine L. Klarstrom, "Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research", Nondestructive Evaluation, November 1998 (vol. 50, no. 11)
- [2] R. Javaherdashti and P. Vimpani, 2003, "Corrosion of Steel Piles in Soils Containing SRB: A Review", Corrosion Control and NDT 2003, paper 034, pp.1-9
- [3] T. Sakoda, T. Arita, H. Nieda, M. Otsubo, C. Honda and K. Ando, "Acoustic emissions caused by the corona discharge in an oil – tank", High Voltage Engineering Symposium 1999
- [4] S. J. Ternowchek, T.J. Gandy, M.V. Calva, and T.S. Patterson, "Acoustic Emission and Ultrasonic Testing for Mechanical Integrity", Acoustic Emission: Standards and Technology Update, ASTM STP 1353, S.J. Vahaviolos, Ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1999
- [5] P.J. van de Loo - Shell, and B. Herrmann - Dow, How Reliable is Acoustic Emission (AE) Tank Testing? The Quantified Results of an AE Usergroup Correlation Study!", NDT.net - February 1999, Vol.4 No.2, <http://www.ndt.net/article/ecndt98/chemical/095/095.htm>
- [6] J. Dimopoulos, D. Foo, D. Olsen, and A. Lim, "CASE STUDY : APPLICATIONS AND LIMITATIONS OF ACOUSTIC EMISSION (AE) TESTING OF TANK BOTTOMS OF ABOVEGROUND STORAGE TANKS (ASTs)", Corrosion Control & NDT, Melbourne, Australia, November, 2003.
- [7] PHILLIP T. COLE, STEPHEN N. GAUTREY, "Development History of the Tankpac AE Tank Floor Corrosion Test", NDT.net , September 2002, Vol. 7 No.09, <http://www.ndt.net/article/v07n09/15/15.htm>
- [8] J. Dimopoulos ATTAR, "Acoustic Emission as a Corrosion Monitoring Tool for Above Ground Storage Tanks", Corrosion Control & NDT, Melbourne, Australia, November, 2003.
- [9] A. Mirakowski, "APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION IN EVALUATION OF PITTING CORROSION IN STEEL", http://www.korozja.pl/1_01_02.pdf.
- [10] S.G. Rong, "Corrosion-related Acoustic Emission and Its Identification", 10Th APCNDT BRISBANE, 2001, <http://www.ndt.net/article/apcndt01/papers/1143/1143.htm>
- [11] J.W.R. Boyd and J. Varley, "The uses of passive measurement of acoustic emissions from chemical engineering processes", Chemical Engineering Science, Volume 56, Issue 5, March 2001, Pages 1749-1767

- [12] F. Bellenger, H. Mazille and H. Idrissi, "Use of acoustic emission technique for the early detection of aluminum alloys exfoliation corrosion", NDT & E International, Volume 35, Issue 6, September 2002, pp.385-392
- [13] C. Jirarungsatean, A. Prateepasen and P. Thungsuk, "The corrosion locating using Acoustic Emission Technique", IE network Conference 2002, October, Thailand, pp. 376-387, 2002
- [14] C. Jirarungsatean, A. Prateepasen and P. Thungsuk, "Corrosion monitoring using Acoustic Emission", Science & Material Technology, Thailand, Vol.2, pp.152-154, 2002
- [15] N. Saenkhum, A. Prateepasen and P. Kaewtrakulpong, "Classification of Corrosion Detected by AE signal", IMECE'2003, Washington, D.C., November, 2003.
- [16] C. Jirarungsatean, A. Prateepasen and P. Kaewtrakulpong, "Pitting Corrosion Monitoring of Stainless Steels by Acoustic Emission", Corrosion Control & NDT, Melbourn, Australia, November, 2003.
- [17] K. Darowicki, A. Mirakowski and S. Krakowiak, "Investigation of pitting corrosion of stainless steel by means of acoustic emission and potentiodynamic methods", Corrosion Science, Volume 45, Issue 8, August 2003, Pages 1747-1756
- [18] R.G. Liptal, H.L. Dunegan and C.A. Tatro, Acoustic Emission Generated During Phase Transformation in Metals and Alloys, Physic & NDT, pp.183-191, 1971
- [19] H. Idrissi, H. Mazille, L. Renaud and Y. Cetre, "Initiation and propagation steps in pitting corrosion of austenitic stainless steels : monitoring by AE", Corrosion Science, 43, 627-641, 2001
- [20] H. Mazille, R. Rothea and C. Tronel, "An acoustic emission technique for monitoring pitting corrosion of austenitic stainless steels", Corrosion Science, Vol.37, No.9, pp.1365-1375, 1995
- [21] B. Assouli, A. Srhiri and H. Idrissi, "Characterization and control of selective corrosion of α , β -brass by acoustic emission", NDT & E International, Volume 36, Issue 2, 1 March 2003, Pages 117-126
- [22] G. T. Burstein and K. Sasaki, "Effect of impact angle on the slurry erosion–corrosion of 304L stainless steel", Wear, Volume 240, Issues 1-2, May 2000, Pages 80-94
- [23] R. Oltra, B. Chapey and L. Renaud, "Abrasion-corrosion studies of passive stainless steels in acidic media: combination of acoustic emission and electrochemical techniques", Wear, Volumes 186-187, Part 2, August 1995, Pages 533-541
- [24] F. Ferrer, H. Idrissi, H. Mazille, P. Fleischmann and P. Labeeuw, A study of abrasion–corrosion of AISI 304L austenitic stainless steel in saline solution using acoustic emission technique", NDT & E International, Volume 33, Issue 6, September 2000, Pages 363-371

- [25] F. Ferrer, H. Idrissi, H. Mazille, P. Fleischmann and P. Labeeuw, "On the potential of acoustic emission for the characterization and understanding of mechanical damaging during abrasion–corrosion processes", *Wear*, Volume 231, Issue 1, June 1999, Pages 108-115
- [26] Ahmet Cakir, Sabri Tuncell and Alptekin Aydin, "Ae response of 316L SS during SSR test under potentiostatic control", *Corrosion Science*, Volume 41, Issue 6, 1 June 1999, Pages 1175-1183
- [27] Liang Xidong, Fan Ju and Chen Lin, "Research on the brittle fracture of FRP rods and its acoustic emission detection", *Power Engineering Society Winter Meeting*, 2000. IEEE , Volume: 4 , 23-27 Jan. 2000, Pages:2812 - 2816 vol.4
- [28] Yoon, D. J., Weiss, W. J., and Shah, S. P., (2000) "Detecting the Extent of Corrosion with Acoustic Emission," *Transportation Research Record* 1698, pp. 54-60
- [29] E Santos-Leal and R J Lopez , "Simultaneous measurement of acoustic emission and electrical resistance variation in stress-corrosion cracking", 1995, *Meas. Sci. Technol.*, pp. 188-195
- [30] R.V. Nieuwenhove and R.W. Bosch, "Acoustic emission detection during stress corrosion cracking at elevated pressure and temperature", 24 th European Conference on Acoustic Emission Testing EWGAE 2000, Senlis France, May 2000
- [31] Ki-Woo Nam, Robert P. Wei and Ajit K. Mal, 1999, *Characteristics of Acoustic Emission Waveforms Generated by Fatigue Crack Extension from Corrosion Sites in Aluminum Alloys*, Third FAA/DOE NASA, September 20 – 23, 1999
- [32] C. Jomdecha, A. Prateepasen, P. Kaewtrakulpong and P. Thungsuk, "Corrosion-Source Location by an FPGA-PC Based Acoustic-Emission System", *IEEE*
- [33] F. Mansfield and P.J. Stocker, "Acoustic Emission from Corroding Electrodes", *Corrosion Engineers*, Vol. 35, No. 12, pp. 541-544, 1979
- [34] Frédéric Ferrer, Thierry Faure, Jean Goudiakas and Eric Andrès, "Acoustic emission study of active–passive transitions during carbon steel erosion–corrosion in concentrated sulfuric acid", *Corrosion Science*, Volume 44, Issue 7, July 2002, Pages 1529-1540

ภาคผนวก ก

Identification of AE Source in Corrosion Process

Asa Prateepasen^a, Chalermkiat Jirarungsatean^b, and Pongsak Tuengsook^c

Department of Production Engineering

King Mongkut's University of Technology Thonburi.

Bangmod, Toong-kru, Bangkok, 10140, Thailand

^aiasaasen@kmutt.ac.th, ^bochatean@kmutt.ac.th, ^cptuengsook@yahoo.com

Keywords: Corrosion, Acoustic Emission source

Abstract. In this paper acoustic emission (AE) was implemented to detect and study the corrosion on austenitic stainless steel grade AISI 304. Two tests were conducted at room temperature using an acidic 30% Chloride solution in passive tests procedure and 3% NaCl solution in electrochemical process. From the experimental works, it appeared that AE signals could be detected during corrosion. Data were studied in time and frequency domain to characterize and to find out the relation between AE parameter and corrosion. In addition the source of generated acoustic signals and corrosive mechanism in the different corrosive environment condition were discussed.

Introduction and AE source in corrosion monitoring

AE is the stress waves produced by the sudden internal stress redistribution of the materials caused by the changes in the internal structure. Previous works showed the similar conclusion that AE technique was efficient for corrosion monitoring. However, the main argument is the source identification of acoustic wave. Mansfield and Stocker [1] found that AE count number related to corrosion rate in various corrosive conditions and showed that the AE sources from the metal were from corrosion activity and the hydrogen bubble occurrences on electrode. The frequency analysis of AE signals in abrasion corrosion process was studied and the results showed that the sources of AE were from the impact of glass bead and gas bubbles [2].

The AE source in pitting and crevice corrosion monitoring were studied by a number of researchers. A. Mirakowski concluded that passive film breakage, the bubble formation and the other actions in corrosion process were considered as sources of AE signal [3]. The AE of gas bubble formation or bubble activity in corrosion process can be set as noise and then eliminated by experimental set up to ensure that it can not interfere AE system analysis. Then, only AE signal was analyzed for pitting corrosion via AE counts in electrochemical method [4, 5]. The experiment used to study the acoustic emission, generated by heating the metals and alloys, confirmed that AE signal was released during the phase transformation of specimens and could be explained in term of an AE parameter which was "count" [6]. In controlled potential of crevice corrosion monitoring, researchers commented that AE signal in the monitoring was detected from all activity sources in corrosion process including gas bubble activities [7]. The gas bubble activity also releases the acoustic wave. Therefore the researches in corrosion process which generated the gas bubble presented the identical discussion that AE source was from bubble activity by comparison of AE counts with and without bubbles [8, 9]. AE event in investigation of pitting corrosion in potentiodynamic methods expressed the relationship of corrosion process and AE source such as bubble [10]. As mentioned above, numerous researchers tried to investigate sources of AE in corrosion process. However, the AE sources are not clear. Consequently, the identification of AE source is the main aim in this work.

Experimental setup

Corrosive environment used in this work consisted of two different corrosive conditions: high chloride ion condition by acidic adjustment and potential control for accelerating the electro-

chemical reaction to produce pitting corrosion. Stainless steel specimens of grade 304 were used on both corrosive conditions. The specimens of size 100 x 100 mm and 1 mm thick were prepared from a stainless steel plate.

As shown in Fig1, the preliminary test was performed using broad band transducer (WD) mounted to down side of the test surface. The result showed that the frequency response of AE from corrosion process was between 100 and 190 kHz. To increase sensitivity of the tests, the transducer of type R15 (PAC) with resonant frequency at 150 kHz was then applied. AE signal was passed to a preamplifier of 60dB gain, and AE parameters were extracted and stored in LOCAN 320. The frequency waveform was recorded by a spectrum analyzer (HP 89410A). For the corrosion study in high chloride concentration tests, 30% NaCl

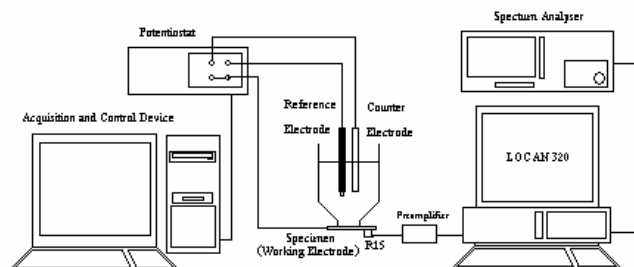


Fig. 1. A schematic of AE system

solution with initial pH adjusted to 2 by adding HCl was performed for 20 hours. For the polarization tests, the electrochemical environment was 3%NaCl solution added with HCL to control its pH at the level of two and a Solartron 1284 was used to control the electrochemically applied potential.

The pitting corrosion rate was controlled by the potentiostat that applied a constant potential (Epit) on specimen for 20 hours. Data received from the sample of SS304 was analyzed. The average frequency and time waveforms were collected every ten minutes.

Results and discussions

AE in high concentration chloride tests. In the high concentration corrosive test condition, the uniform corrosion can be observed on the material surface for 60 hours. The chloride ion in solution disrupted the mechanism of passive film produce, so in high chloride condition the material could not reproduce the passive film. Material surface with a passive film had lower corrosion resistance and caused the localized corrosion such as pitting corrosion. It should be noted that crevice corrosion can occur in the smaller amount oxygen location. To avoid the crevice corrosion, the solution container must be carefully mounted to the specimen to leave no gap between them.

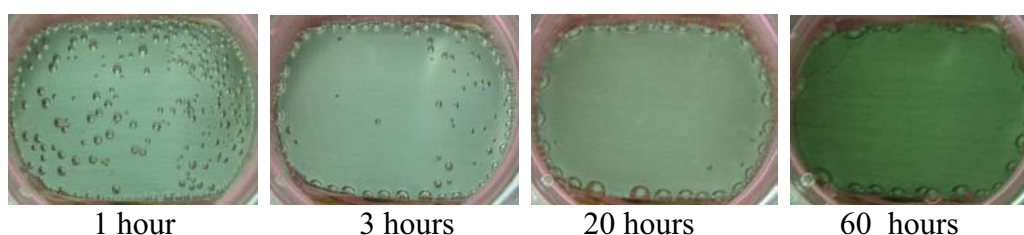


Fig. 2. Hydrogen bubble formation on surface of SS304 in 30% NaCl pH=1.

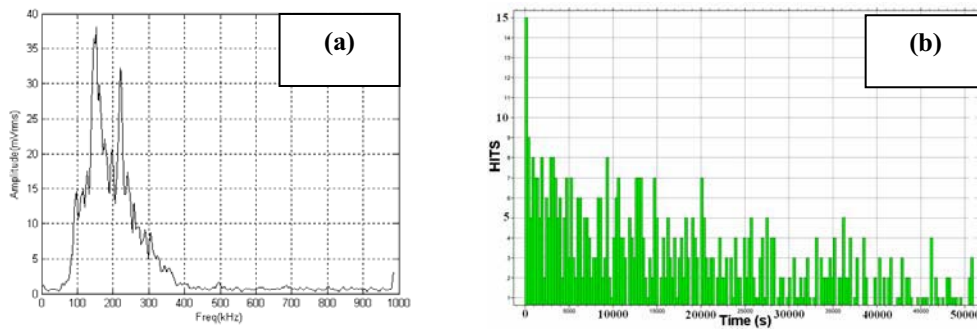
The observation of corrosion process during 60 hours showed occurrences of uniform corrosion and products of corrosion such as hydrogen bubbles on the material surface as shown in Fig 2. The amount of hydrogen bubble continuously decreased with time. It showed a high number of hits in the initial stage of corrosion then significantly decreased. The bubble sizes occurred during the tests were inconsistent. It exhibited that the AE signals received were due to the burst of the gas bubble activity as evident from the amounts of hydrogen bubbles. Pressure (P) and force (F) from the burst of bubble can be shown as $P=2\alpha/R$ [N/m²] and $F=2\pi R^2P$, where α [N/m] is a tension coefficient of the bubble in the corrosive medium and the radius of bubble is R[m]. The burst of gas bubble on the material surface caused the corrosion occur [11].

For the reason that hydrogen bubble was released from material surface, the oscillation frequency of gas bubble (f [Hz]) generated by the movement of gas bubble in the corrosive medium has a relationship with the radius of gas inside the bubble surface [12]:

$$f = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{3\gamma p}{\rho}} \quad (1)$$

where r [m] is the radial coordinate in the spherical frame (with origin at center of a bubble), γ [J/(kg·K)] is the specific heat of a gas, and ρ [kg/m³] is density of the surrounding fluid.

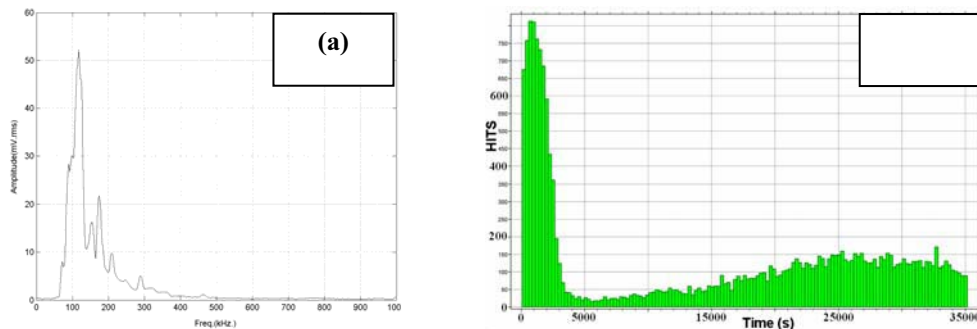
The Eq. (1) shows that size of bubble and frequency has invert relationship. In this experiment, the diameter of the gas bubbles was captured and their diameters were measured. Median value from the set was selected as the representative of the bubble stage. It appeared that the bubble size approximately 0.03-0.05 mm was found in the initial stage of corrosion. The signal in frequency domain showed that the detected frequency of AE signal was in the range of 125-225 kHz (see Fig. 3a). It exhibited good relation to the size of the gas bubble according to the Eq. (1). The classification of AE source by the frequency analysis has applied for identification of AE source in chemical reaction process [13, 14].



(a) Sample average AE waveform in frequency domain (b) AE parameters in time domain

Fig. 3. AE signal obtained from 30%NaCl pH=1 corrosive condition test

It can be concluded that AE source of corrosion process in high concentration chloride is the hydrogen bubble action since the hit number of detected AE signal changes simultaneously to the amount of gas bubbles (see Fig 2 and 3b.). In addition, the frequency response of AE signal was related to the bubble size along the course of the experiment. Although the corrosion process consists of various AE sources such as the corrosion activity and the passive film breakage, AE signal of the hydrogen bubble action displayed higher amplitude and hit number than the other sources.



(a) Sample average AE waveform in frequency domain (b) Hit parameters in time domain

Fig. 4. AE signal obtained from controlled potential corrosion test

AE in Electrochemical Corrosive Tests. In the electrochemical corrosive experiment, there is no bubble appearance on material surface; however, there were some gas bubbles generated around the counter electrode. Nevertheless the AE signal received from the hydrogen bubble action in this process could be eliminated by extending the distance between the AE sensor and the cathode electrode in which the bubble was generated. Consequently the AE signal detected in the potential

control of the corrosion process was received from only corrosion mechanism signal. The potentiostatic tests were controlled at the constant potential, $E_{pit} = 0.266$ Volts, as it caused an onset of pitting corrosion in this material and environment. The E_{pit} value was carried out from the polarization curve of potentiodynamic tests. This corrosion test condition was controlled by accelerating the pit occurrences until the specimen was broken through. The frequency response of AE in this experiment was illustrated in Fig 4a where the average frequency of AE in frequency domain obtained from the corrosion signals was around 110 kHz. The range of frequency response of AE signal is unlike AE signal received from the bubble formation mentioned in the previous results and other researches [15]. The peak amplitude of frequency spectrum illustrated in Fig 4b is higher than that shown in Fig 3a because the corrosion rate in electrochemical corrosive tests are much more severe than in high concentration chloride tests.

In addition, the results of this part can be explained that the corrosion mechanism contained two stages: passive film breakage and pitting corrosion stages. Time domain analyzes showed that AE hit and amplitude were related to the changing of material in corrosive solution. Fig. 4b showed that the breakage of passive film caused a high number of hits in the initial corrosion period. Then the number of hit decreased in next stage but rose again when the pit occurred at another side of the material due to the corrosion of passive film layer.

Conclusions

Two experimental tests were performed to clarify AE sources. It can be concluded that different corrosive environment condition causes different dominant AE sources. In high concentration chloride test, impact and burst of hydrogen bubble is dominated whereas in electrochemical corrosive test, the AE sources are passive film breakage and pitting corrosion. AE parameters exhibit good correlation with corrosion activities. In high corrosion chloride test, AE signal in frequency domain displays high relationship with size of the bubbles. For electrochemical corrosive tests, the number of AE hit arises at the initial stage and significantly decreases in the pitting corrosion stage.

Acknowledgments

The authors wish to acknowledge support from “Commission on Higher Education” and “The Thailand Research Fund”, and would like to thank Dr. G. Lothongkum, Dr. P. Kaewtrakulpong and Mr. C. Jomdecha for their comments.

References

- [1] F. Mansfield and P.J. Stocker: Corrosion Engineers, Vol. 35, No. 12, pp. 541-544, 1979
- [2] F. Ferrer, H. Idrissi and P. Labeeuw: Wear, Vol. 231, Issue 1, June 1999, pp. 108-115
- [3] Information on http://www.korozja.pl/1_01_02.pdf.
- [4] H. Mazille and C. Tronel: Corrosion Science, Vol. 37, No.9, pp.1365-1375, 1995
- [5] H. Mazille, L. Renaud and Y. Cetre: Corrosion Science, Vol. 43, pp. 627-641, 2001
- [6] R.G. Liptal, H.L. Dunegan and C.A. Tatro: Physic & NDT, pp.183-191, 1971
- [7] Y. P. Kim and G. Santarini: NDT & E International, Vol. 36, December 2003, pp. 553-562
- [8] T. W. Rettig and M. J. Felsen: Corrosion-NACE, Vol. 32, No. 4, 1976
- [9] F. Ferrer and E. Andr  s: Corrosion Science, Vol. 44, Issue 7, July 2002, pp. 1529-1540
- [10] K. Darowicki and S. Krakowiak: Corrosion Science, Vol. 45, August 2003, pp. 1747-1756
- [11] C. Jirarungsatean, A. Prateepasen and P. Tuengsook: Science & Material Technology, Thailand, Vol.2, pp.152-154, 2002
- [12] T.G. Leighton: The Acoustic Bubble (San Diego)
- [13] J. Boyd and J. Varley: Chemical Engineering Science, Vol. 56, March 2001, pp. 1749-1767
- [14] R. M. Lec: The IEEE International Frequency Control Symposium, pp. 978-982
- [15] B. Assouli and H. Idrissi: NDT & E International, Vol. 36, Issue 2, 2003, pp. 117-126

ภาคผนวก ข

ผลของการถ่ายเทประจุทางไฟฟ้าเคมีต่อสัญญาณอะคูสติกใน การตรวจจับการกัดกร่อนด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน

เฉลิมเกียรติ จิระรุ่งเสถียร, อาษา ประทีปเสน และ เมธิณี มุกดาสิริ

ภาควิชาอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีภายใต้สภาวะควบคุมในการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในสารกัดกร่อนโซเดียมคลอไรด์เจือจางและปรับความเป็นกรดให้เท่ากับ 2 ได้ถูกนำมาศึกษาความสัมพันธ์ในการเกิดสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน กับการถ่ายเทประจุไฟฟ้าทั้งในสภาวะที่ต้านการกัดกร่อนและขณะเกิดการกัดกร่อน โดยการวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าเคมีแบบพลวัตน์ (Potentiodynamic Test) ซึ่งการวิเคราะห์โดยใช้ค่าตัวแปรทางอะคูสติกแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของสัญญาณอะคูสติกที่มีความสัมพันธ์กับกลไกของการกัดกร่อนที่มีความแตกต่างกันของแต่ละขั้นของการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting Corrosion) ซึ่งสอดคล้องกันกับกลไกที่เกิดขึ้นจริงจากการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี และ ผลการทดลองสามารถอธิบายถึงผลจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าในกระบวนการกัดกร่อนที่มีต่อการเกิดสัญญาณอะคูสติกโดยการวิเคราะห์การตรวจจับสัญญาณในช่วงเวลาการทดลอง นอกจากนี้ ผลการทดลองยังเป็นการยืนยันว่าการกัดกร่อนแบบหลุมลึกสามารถตรวจจับได้ด้วยการตรวจสอบแบบอะคูสติกอิมิชชัน

คำสำคัญ : การกัดกร่อน, การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี, อะคูสติกอิมิชชัน

The Effect of Electrochemical Charge Transfer on Acoustic Signal in Corrosion Monitoring by Acoustic Emission Technique

C. Jirarungsatian, A. Prateepasen and M. Mukdasiri

**Department of Production Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's University of Technology Thonburi
126 Pracha-Utit Rd., Thungkru, Bangkok, 10140 Thailand**

Abstract

The pitting corrosion of AISI 304 in diluted sodium chloride solution acidified to pH 2 and controlled by electrochemical process controller was studied. The relation between acoustic wave generation and the electrical charge transfer during corrosion process was carried out. The potentiodynamic method was used. The acoustic emission analysis via acoustic parameter showed good relation between the acoustic signal characteristic and pitting corrosion mechanism based on electrochemical analysis. The explanation of the effect of charge transfer to acoustic signal was discussed in this paper. In addition, it was confirmed that pitting corrosion can be detected by Acoustic Emission technique.

Keyword: Corrosion, Electrochemical Analysis, Acoustic Emission

1. บทนำ

การวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุหรือโครงสร้างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกัดกร่อนโดยอาศัยการปลดปล่อยของคลื่นความเค้น (Stress Wave) ที่เรียกว่าการตรวจสอบแบบไม่ทำลายวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ชัน ได้มีการพัฒนาให้เกิดความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อได้เปรียบบางประการที่ดีกว่าการตรวจสอบการกัดกร่อนแบบวิธีอื่น เช่น ความรวดเร็วในการตรวจสอบ ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในการตรวจสอบที่น้อยกว่า เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยจากกลุ่มผู้วิจัยจำนวนมาก ได้พยายามวิจัยเพื่อเพิ่มความสามารถและความแม่นยำให้มากยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการวิจัยอะคูสติกจากการกัดกร่อนของวัสดุที่เป็นเหล็กคาร์บอน [1], อลูมิเนียมอัลลอย [2,3] หรือเหล็กกล้าไร้สนิม [4,5] ในสภาวะกัดกร่อนแบบต่าง ๆ ซึ่งการวิเคราะห์การกัดกร่อนโดยการควบคุมปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Technique) ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยเพื่อกำหนดสภาวะศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนให้เป็นไปตามต้องการเพื่ออธิบายถึงปรากฏการณ์ และความเกี่ยวข้องกันของสัญญาณอะคูสติกที่ตรวจวิเคราะห์ผ่านค่าตัวแปรอะคูสติกรูปแบบต่าง ๆ [6-10] ซึ่งผลการวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการบอกว่ามีการกัดกร่อนเกิดขึ้นหรือไม่ หรือกระบวนการ กัดกร่อนมีความสอดคล้องกับสัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับได้ [11] ซึ่งการวิเคราะห์ต่าง ๆ เหล่านี้ยังมีข้อโต้แย้งกันอยู่ในเรื่องของแหล่งกำเนิดของอะคูสติกที่นำมาวิเคราะห์ [12] และจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาถึงแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ในระบบการกัดกร่อนเพื่อแสดงลักษณะเฉพาะของแต่ละแหล่งกำเนิดออกมาผ่านพารามิเตอร์ทางอะคูสติกในสภาวะกัดกร่อนที่ต่างกันได้อย่างชัดเจน [13] อย่างไรก็ตามการเกิดการกัดกร่อนภายใต้สภาวะที่กำจัดสัญญาณรบกวนทางกลอันเนื่องมาจากฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยากัดกร่อน และสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าออกไป ให้คงเหลือเพียงสัญญาณจากการกัดกร่อนเท่านั้น ผลของการถ่ายเทของประจุอย่างต่อเนื่องระหว่างการกัดกร่อนอาจส่งผลต่อการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกได้เช่นกัน ซึ่งจะนำไปสู่การแปลผลที่มีความผิดพลาด

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลจากการถ่ายเทประจุของการกัดกร่อนที่อาจส่งผลต่อการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกในกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับประกอบเป็นถังพักวัตถุดิบในทางอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมอาหาร โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก โดยการควบคุมศักย์ไฟฟ้า และการวิเคราะห์โดยเทคนิคไฟฟ้าเคมี ลักษณะการได้รับของสัญญาณอะคูสติก และการวิเคราะห์ผ่านค่าตัวแปรอะคูสติกสามารถบอกได้ถึงผลของการถ่ายเทประจุไฟฟ้า และสิ่งที่ตรวจจับได้ว่ามีความสอดคล้องกับการกัดกร่อนอย่างไร