

# Elastic-Plastic Fracture Toughness ของเหล็กหล่อและความสัมพันธ์ กับรูปทรงของกราฟและปริมาณ ของเพียร์ไลต์ในเนื้อพื้น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริทรรศน์ พันธุ์รียงก์<sup>(1)</sup>  
มาชาโนริ อิโตะ<sup>(2)</sup>, ดร.ทาคาเทรุ อุเมดะ<sup>(3)</sup>, ดร.ยาสุโอะ คิมูระ<sup>(4)</sup>  
ดร.คาซุฮิโกะ คุริบายาชิ<sup>(5)</sup>, และ ดร.เทรุโอะ คิชิ<sup>(6)</sup>

## บทคัดย่อ

การทดลองนี้เป็นการวัดค่า Elastic Plastic Fracture Toughness ของเหล็กหล่อซึ่งมีกราฟรูปทรงต่าง ๆ และมีเนื้อพื้นประกอบด้วยเพียร์ไลต์ปริมาณต่าง ๆ กัน โดยวิธีความต่างศักย์ไฟฟ้า (EP) และอคูสติกอิมิตชัน (AE) ได้ค่าความสัมพันธ์ของค่า Elastic-Plastic Fracture Toughness หรือ J-integral ว่า ค่าของ  $J_{in}$  (AE) และ  $J_{in}$  (EP) ซึ่งประเมินจากจุดโค้งกลับของเส้นโค้ง AE event count และเส้นโค้งศักย์ไฟฟ้า กับค่าของ  $J_{in}$  (R) ประเมินจากจุดตัดของ blunting line และเส้นโค้ง R จากการพล็อต  $J - \Delta a$  (EP) เขียนเป็นสมการ

$$J_{in} (R) = 1.34 J_{in} (AE) = 1.34 J_{in} (EP)$$

และสามารถใช้ค่า  $J_{in}$  (R) เป็นค่า  $J_{IC}$  ในเหล็กหล่อได้ ซึ่งค่า  $J_{IC}$  นี้แสดงเป็นสมการถดถอยสัมพันธ์กับค่า

nodularity  $n$ (%) และปริมาณเพียร์ไลต์ในเนื้อพื้น  $P$ (%) ดังนี้

$$J_{IC} = 16.614 + 0.500 N(\%) - 0.060 P(\%) - 0.004 n(\%) P(\%)$$

## 1. บทนำ

นับตั้งแต่ได้มีการพัฒนาเหล็กหล่อกราฟต์กลมขึ้นมาใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม ได้มีงานวิจัยต่าง ๆ มากมาย เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการผลิต และรวบรวมข้อมูลคุณสมบัติในการใช้งานจริงต่าง ๆ ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติที่แท้จริงของวัสดุชนิดนี้ได้ ในระยะหลังได้มีการนำเหล็กหล่อเข้ามาใช้งานแทนเหล็กกล้าในการทำผลิตภัณฑ์หล่อ หรือผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปต่าง ๆ มากมายหลายชนิด นอกจากนี้

(1) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยโตเกียว (ปัจจุบันจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย), ดร.

(2) เหมือน (1) (ปัจจุบันเป็นวิศวกรประจำบริษัทฟูจิคุระ เดงเซ็น)

(3) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยโตเกียว, ดร.

(4) เหมือน (3) (ปัจจุบันคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยโตเกียว), ดร.

(5) สถาบันวิจัย วัสดุอวกาศ, ดร.

(6) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยโตเกียว สถาบันวิจัย Boundary Territory, ดร.

ยังได้มีการพัฒนาเหล็กหล่อชนิด **Compacted Vermicular (CV)** ขึ้นมาใช้ในงานด้านต่าง ๆ อีกมากมาย จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเหล็กหล่อได้เข้ามามีบทบาทในเชิงอุตสาหกรรมเป็นอย่างสูง ภายใต้สภาวะการณเช่นนี้ จึงมีความต้องการที่จะได้มีการพัฒนาความเชื่อมั่นของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น ซึ่งจะต้องมีการประเมินคุณสมบัติของวัสดุเหล็กหล่อ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประเมินเชิงปริมาณของความแข็งแรง (**STRENGTH**) และความแกร่ง (**TOUGHNESS**) เริ่มมีความจำเป็นมากยิ่งขึ้น

ในการทดลองนี้ ได้ทำการประเมินความแข็งแรงและความแกร่งของวัสดุเป็นค่าพารามิเตอร์ โดยการแปรผันเนื้อพื้นของวัสดุเหล็กหล่อจากเฟอไรต์ที่มีความแกร่งสูงไปเป็นเพียร์ไลต์ที่มีความแกร่งต่ำ แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่า **Elastic-Plastic Fracture Toughness  $J_{IC}$**  ของวัสดุ ซึ่งเป็นค่าที่ประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางมีการพิจารณาวิธีการประเมินค่า  $J_{IC}$  ของวัสดุด้วยขั้นตอนทดสอบขั้นเดียว โดยวิธีความแตกต่างของศักดาไฟฟ้า (EP) และวิธีอคูสติกอิมพัลส์ชัน (AE) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจะหาความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างรูปทรงของกราฟไฟต์ โครงสร้างของเนื้อพื้นและค่า  $J_{IC}$

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 การทำขั้นทดสอบและคุณสมบัติเชิงกล

ขั้นงานทดสอบแบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภท

I. เหล็กหล่อกราไฟต์กลม (ต่อไปจะเรียกย่อว่า **FCD**) ในสภาพ **as-cast** มีเพียร์ไลต์ในเนื้อพื้น 13% ทำการอบชุบเพื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณเพียร์ไลต์ในเนื้อพื้น

II. เหล็กหล่อไฮโปยูเทคติก (**CE = 3.8%**), ยูเทคติก (**CE = 4.2%**), ไฮเปอร์ยูเทคติก (**4.7%**) ใช้ในสภาพ **as-cast** และทำการอบชุบเพื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณเพียร์ไลต์

เหล็กหล่อประเภทที่ I ทำการหล่อในเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าความถี่ต่ำ (ขนาด 5 ตัน) หล่อเป็น **Y Block** หน้า 75 มม. ส่วนประเภทที่ II นั้น หล่อในเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าความถี่สูง (ขนาด 30 กก.) โดยใช้แบกรัไฟต์ขนาด 15 กก. หล่อเป็น **Y Block** หน้า 25 มม. เหล็กหล่อที่มีคาร์บอนต่ำ และมีเลเดบิวไรต์เจือปนอยู่มากจะทำการอบชุบเพื่อกระจายซีเมนไตท์ในยูเทคติก โดยอบที่ 900°ซ. เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวลง 33°ซ./ชั่วโมง รักษาอุณหภูมิไว้ที่ 700°ซ. เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำให้เย็นตัวลง 30°ซ./ชั่วโมง จนถึง 550°ซ. แล้วทิ้งให้เย็นในอากาศ ทำให้ได้โครงสร้างเป็น 100% เฟอไรต์ ส่วนโครงสร้างเพียร์ไลต์นั้นใช้การอบชุบที่ 900°ซ. เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในอากาศ

ตารางที่ 1 แสดงว่าส่วนประกอบทางเคมี, ความต้านแรงดึง **nodularity** (วัดโดยวิธีการของสมาคมหล่อโลหะแห่งประเทศไทย), ปริมาณของเพียร์ไลต์ (วัดโดยวิธี **pointcount**) กราไฟต์ในเหล็กหล่อกราไฟต์กลมทั้งหมด มีขนาดประมาณ 48  $\mu$

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมี, nodularity, ปริมาณของเพียร์ไลต์ และคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ โดยที่ n = nodularity (%), P = ปริมาณเพียร์ไลต์ในเนื้อพื้น (%), b = ความต้านแรงดึง MPa, y = 0.2% Proof Stress MPa, b = ส่วนยืด %, o = อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่ %

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Sn	Mg	Ti	n(%)	P(%)	$\sigma_b$	$\sigma_y$	$\sigma_b$	$\phi$
FCD 40	3.60	2.80	0.20	0.20	0.01	0.01	0.06	0.10		0.06		83	0	440	320	29.1	23.8
FCD 1												83	13	445	312	15.8	12.0
FCD 2												83	48	722	446	9.9	9.5
FCD 3												83	70	760	474	8.5	7.0
FCD 4												83	80	763	481	6.7	5.0
FCD 5												83	99	807	496	4.1	3.2
FC 30	3.20	1.80	0.70	0.03	0.02	0.30	0.05					0	100	277	215	1.9	0.5
C 5	3.70	2.80	0.11	0.022	0.006	0.02	0.02	0.01		0.092	0.21	40	0	158	127	4.5	1.1
G 2	3.74	2.67	0.12	0.055	0.007	0.01	0.03	0.02	0.002		0.05	35	25	347	250	13.5	9.2
C 7	3.74	2.66	0.13	0.057	0.010	0.01	0.03	0.02	0.004	0.094	0.26	35	98	263	231	3.0	1.3
I 1	3.52	2.27	0.13	0.041	0.013	<0.01	0.04	0.02	0.004	0.042	0.03	81	99	354	251	11.2	7.8
I 3	3.30	2.14	0.10	0.038	0.017	<0.01	0.04	0.04	0.004	0.024	0.03	0	0	135	119	3.9	1.2
I 4	3.25	2.34	0.10	0.041	0.008	<0.01	0.04	0.02	0.004	0.047	0.03	74	100	735	454	3.9	1.4
I 5	3.33	2.38	0.10	0.042	0.007	<0.01	0.04	0.01	0.005	0.064	0.03	77	0	396	250	26.9	20.1
I 6	3.29	2.49	0.11	0.041	0.008	<0.01	0.04	0.02	0.005	0.059	0.03	77	100	689	476	4.1	3.6
J 1	3.48	2.58	0.11	0.038	0.011	<0.01	0.04	0.02	0.006	0.038	0.06	50	0	362	254	12.0	9.7
J 2	3.34	2.50	0.10	0.040	0.008	<0.01	0.04	0.02	0.006	0.036	0.05	61	100	597	439	2.7	5.9
J 3	3.31	2.36	0.10	0.040	0.011	<0.01	0.04	0.02	0.005	0.046	0.05	67	57	505	321	8.4	6.6
J 4	3.29	1.88	0.10	0.041	0.009	<0.01	0.04	0.02	0.005	0.050	0.03	75	0	357	224	18.8	12.4
J 5	3.34	2.21	0.11	0.040	0.012	<0.01	0.04	0.02	0.005	0.045	0.04	75	65	517	322	12.7	9.3
J 6	3.35	2.41	0.11	0.040	0.009	<0.01	0.04	0.02	0.005	0.048	0.07	61	0	384	264	17.4	13.6
J 7	3.31	2.27	0.10	0.041	0.008	<0.01	0.04	0.02	0.005	0.052	0.07	82	75	527	359	5.2	4.1
J 8	3.39	2.38	0.10	0.041	0.014	<0.01	0.03	0.01	0.006	0.058	0.15	41	100	646	443	2.8	2.4
J 9	3.39	2.43	0.10	0.043	0.011	<0.01	0.03	0.01	0.006	0.070	0.16	50	62	494	330	6.2	5.3
J 10	3.34	2.29	0.10	0.038	0.029	<0.01	0.03	0.01	0.005	0.068	0.16	49	0	382	271	17.4	13.6
K 1	3.12	1.71	0.10	0.041	0.011	<0.01	0.04	<0.01	0.004	0.04	0.03	81	86	551	310	7.8	6.4
K 2	3.09	1.82	0.10	0.040	0.010	<0.01	0.04	<0.01	0.004	0.063	0.02	84	0	376	224	23.0	19.3
K 3	3.12	1.83	0.10	0.040	0.011	<0.01	0.04	<0.01	0.004	0.051	0.02	82	100	770	444	4.5	3.5
K 4	3.23	1.87	0.10	0.040	0.011	<0.01	0.04	<0.01	0.004	0.058	0.07	60	79	512	289	8.8	7.2
K 5	3.26	1.86	0.10	0.040	0.012	<0.01	0.04	<0.01	0.004	0.070	0.08	63	0	360	224	17.1	15.2
K 6	3.29	1.88	0.10	0.041	0.014	<0.01	0.04	<0.01	0.004	0.064	0.10	78	100	691	425	3.3	3.0
K 7	3.29	1.82	0.10	0.040	0.015	<0.01	0.04	<0.01	0.005	0.071	0.15	61	0	358	225	18.9	15.8
K 8	3.38	2.02	0.10	0.041	0.009	<0.01	0.04	<0.01	0.005	0.055	0.14	59	78	503	296	8.7	8.0
K 9	3.13	1.79	0.10	0.039	0.008	<0.01	0.04	<0.01	0.005	0.054	0.14	56	100	629	426	2.7	1.8

## 2.2 การวัดค่า $J_{IC}$

ชิ้นงานทดสอบมีขนาดความหนา (B) 20 มม. กล่าวคือ เป็นชิ้นงานมาตรฐานขนาด 0.8 TCT การติดตั้งหัววัดศักดาไฟฟ้า หัวต่อกระแสไฟฟ้า และ AE Sensor และระบบการวัดค่าต่างๆ เป็นไปตามรายงานฉบับที่ผ่านมา<sup>3)</sup> ก่อนการทดสอบจะทำการ Pre-crack ด้วยแรงสูงสุด  $P_{max} = 8 \text{ KN}$  ให้มีความยาวของ Pre-crack  $a_0$ /ความกว้างของชิ้นทดสอบ  $W = 0.5$  จากนั้นจึงติดตั้งชิ้นงานทดสอบเข้าเครื่องดึง ติดตั้งระบบวัดค่าศักดาไฟฟ้า, AE แล้วทำการดึงทดสอบจนแตกหัก โดยวัดค่าแรง P, displacement  $\delta$ , AE และความต่างศักย์ในขณะที่ทำการทดสอบ

การวัดค่า AE จะทำการติด Sensor ทางส่วนบนและล่าง ให้สมมาตรกันเมื่อเทียบกับรอยแตก Sensor ที่ใช้เป็น Transducer (รุ่น NAISF 217M ความถี่กำหวน 200 kHz ความไวสูงสุด  $2.5 \text{ kVs m}^{-1}$ ) เพื่อ

จับเฉพาะสัญญาณที่มาถึงในเวลาเดียวกัน (Dissolving Capacity  $2 \mu\text{s}$ ) เป็นค่าสัญญาณประสิทธิผล Threshold Voltage วัดจากสัญญาณขาออกของ Transducer มีค่า  $500 \mu\text{V}$  ค่าสัญญาณ AE ที่ใช้เป็นพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าผลรวมของ AE even count และผลรวมของ AE energy ซึ่งเป็นค่าศักดาไฟฟ้าที่สูงที่สุด  $V_p$  ยกกำลังสอง

ส่วนการวัดค่าความแตกต่างของศักดาไฟฟ้านั้น ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 20 แอมแปร์ ให้ไหลผ่านชิ้นงาน แล้ววัดค่าความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากรอยแตกที่ชิ้นทดสอบขยายตัว ตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดศักดาไฟฟ้าจะอยู่ในตำแหน่งซึ่งการผันแปรของศักดาไฟฟ้ามีน้อยที่สุด โดยพิจารณาจากเส้นโค้งศักดาไฟฟ้าตามการทดลองของ Aronson and Ritchie<sup>1)</sup> ค่าความเที่ยงตรงในการวัดศักดาไฟฟ้าคือ  $1 \mu\text{V}$

นอกจากนี้เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกในการวัดค่าสัญญาณ AE, และค่าศักดาไฟฟ้า จะนำการ

หุ้มฉนวนที่หมุดยึดชิ้นงานและ clip guage อย่างสมบูรณ์ เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องที่สุด

การประเมินค่า Jintegral จะใช้สมการจากมาตรฐาน ASTM 813<sup>2)</sup> ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$J = (A/Bb) \cdot f(a_0/w)$$

$$f(a_0/w) = 2(1+2) / (1+2) \dots \dots \dots (1)$$

$$= [(2a_0/b)^2 + (2a_0/b)+2]^{1/2} - 2a_0/b + 1$$

ในที่นี้ A = พื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง Load-Displacement

B = ความหนาของแผ่นทดสอบ, มม.

b = ความยาวของเนื้อชิ้นทดสอบที่เหลื่ออยู่ (ligament), มม.

a<sub>0</sub> = Pre-crack length, มม.

การวัด Load-Displacement นั้นจะวัดจาก Displacement ของ Clip guage (δ) ซึ่งจะมีจุดหมุนอยู่ที่ 40% ของ ligament

การกำหนดค่า J<sub>IC</sub> จะวัดจากจุดที่เส้นโค้ง EP และเส้นโค้งผลรวม AE event count N วกกลับสูงขึ้น ส่วนรอยแตกที่ขยายตัว Δa นั้น อาจคำนวณได้จากค่าศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น แต่จากการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองโดยวัสดุเหล็กหล่อ กับค่าจากการคำนวณด้วย FEM (Finite Element Method) โดย Aronson and Ritchie<sup>3)</sup> พบว่า ค่าที่ได้สอดคล้องกัน ดังนั้นจึงประมาณค่า Δa จากเส้นโค้งของ Aronson and Ritchie แล้วนำมาเขียนเส้นโค้ง R (R-curve) จากนั้นจึงกำหนดค่า J<sub>IC</sub> โดยวิธีเส้นโค้ง R ที่ได้จากความต่างศักดาไฟฟ้า

เหล็กหล่อที่มีโครงสร้างเป็นเพียร์ไลต์นั้น เมื่อเปรียบเทียบกับพวกที่มีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์ที่แล้ว จะมีความแกร่งที่อุณหภูมิต่ำ การทดลองหาค่า Fracture Toughness ของวัสดุประเภทนี้สอดคล้องกับเงื่อนไข

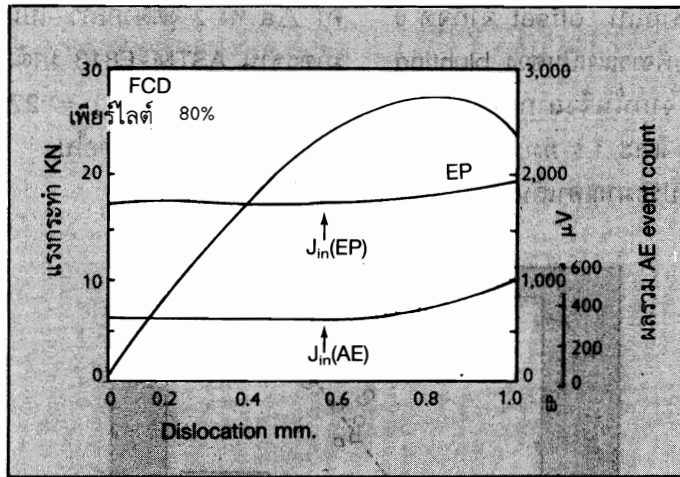
การหาค่า K<sub>IC</sub> ตามมาตรฐาน ASTM E 399<sup>4)</sup> แต่เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบอิทธิพลของรูปทรงของกราฟไฟต์ จึงใช้การวัดค่า J<sub>IC</sub> ทั้งหมด โดยไม่ได้มีการวัดค่า K<sub>IC</sub> หรือแปลงค่า J<sub>IC</sub> เป็น K<sub>IC</sub> แต่อย่างใด

### 3. ผลการทดลอง

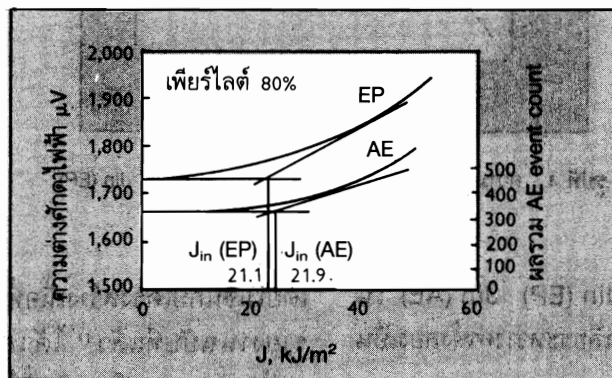
#### 3.1 การวัดค่า Jin และการกำหนดค่า J<sub>IC</sub> โดยวิธีความต่างศักดาไฟฟ้าและวิธี AE

รูปที่ 1 แสดงผลการทดสอบชิ้นงานเหล็กหล่อกราฟไฟต์กลมที่เนื้อพื้นที่มีเพียร์ไลต์ 80% ซึ่งประกอบด้วยเส้นโค้ง Load-Displacement เส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงศักดาไฟฟ้า EP และเป็นเส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงของผลรวม AE event count N จากมาตรฐาน JSME<sup>5)</sup> สามารถประเมินค่า J-Integral ได้โดยการพิจารณาเส้นโค้งของ EP และ AE ณ จุดวกขึ้น เป็นจุดที่รอยแตกเริ่มขยายตัว ซึ่งนิยามจุดนี้ว่าเป็นค่า J-Integral ณ จุดที่รอยแตกเริ่มขยายตัวและใช้สัญลักษณ์ Jin (EP) และ Jin (AE) เพื่อแยกแยะค่าจากวิธีการความต่างศักย์ไฟฟ้าและวิธีการ AE ตามลำดับ การประเมินค่าจากจุดวกกลับของเส้นโค้งนี้ เป็นการประเมินค่าจากการที่สัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณ AE เริ่มมีค่ามากขึ้น ซึ่งใช้วิธีการ differentiate เพื่อหาจุดวกกลับ โดยอาจมีความผิดพลาดบ้างเล็กน้อย

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า EP และ AE เทียบกับค่า J. Integral ซึ่งสามารถประเมินค่า Jin ได้ในลักษณะเดียวกับรูปที่ 1 การประเมินค่า Jin จากจุดวกกลับของเส้นโค้งตามรูปที่ 1 และรูปที่ 2 นี้ได้ค่า Jin ใกล้เคียงกันสำหรับชิ้นงานทดสอบทุกชุดในการทดสอบครั้งนี้ นอกจากนี้ค่า Jin (EP) และค่า Jin (AE) ก็มีค่าใกล้เคียงกันด้วยดังแสดงในรูปที่ 2



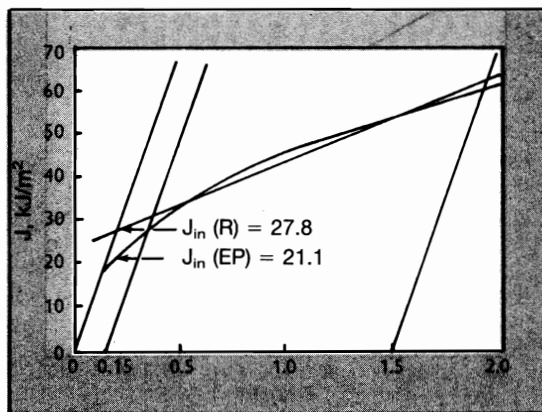
รูปที่ 1 Load Displacement, EP และ AE event count (ปริมาณเพียร์ไลต์ 80%, nodularity 83%)



รูปที่ 2 EP, ผลรวม AE event count และ J-Integral

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารอยแตกที่ขยายตัว  $\Delta a$  ซึ่งกำหนดมาจากวิธีความต่างศักย์ไฟฟ้า และค่า J-Integral ค่า  $\Delta a$  นั้น กำหนดมาจากเส้นโค้งที่ calibrate มาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า EP/EP<sub>0</sub>. (EP<sub>0</sub> คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าขณะที่ Load เป็น 0) และค่าความยาวของรอยแตก  $a/w$  ซึ่งได้แสดงไว้ในกราฟทดลองของ Aron-

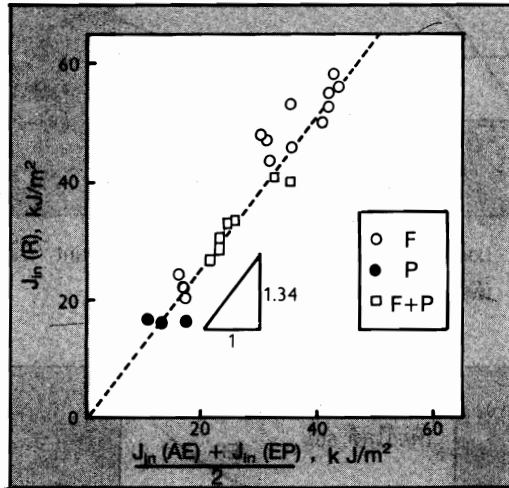
son and Ritchie จากกราฟนี้ทำให้สามารถหาค่า  $\Delta a$  จากค่า EP ที่ได้จากการทดลองชั้นทดสอบครั้งนี้ได้ เรียกว่าค่า  $\Delta a$  (EP) กล่าวอีกนัยหนึ่ง รูปที่ 3 คือเส้นโค้ง J- $\Delta a$  (EP) ที่สร้างมาจากการทดลองด้วยชิ้นงานทดสอบชิ้นเดี่ยวนั่นเอง



รูปที่ 3 เส้นโค้ง J -  $\Delta a$  (EP) (FCD, ปริมาณเพียร์ไลต์ 80%) :

จากกราฟ J-a (EP) ลากเส้น offset จากจุด 0 สัมผัสกับเส้นโค้งช่วงเริ่มต้นโดยพิจารณาเป็นช่วง blunting zone ตาม ASTM-E813 จากนั้นจึงลากเส้นจากจุด  $\Delta a$  (EP) เท่ากับ 0.15 มม. และ 1.5 มม. ขนานกับเส้น offset แล้วลากเส้นตรงประมาณค่าเส้นโค้งระหว่าง

ค่า  $\Delta a$  ทั้ง 2 จุดดังกล่าว เป็นเส้น blunting line ตามมาตรฐาน ASTM-E813 มาตัดกับเส้น offset ได้จุดตัดเป็นค่า  $J_{in}$  ( $J_{in}(R)$ ) =  $27.8 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$  ค่า  $J_{in}(R)$  นี้ ใช้เป็นค่าของ  $J_{IC}$  ต่อไป



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $J_{in}(R)$ ,  $J_{in}(AE)$  และ  $J_{in}(EP)$

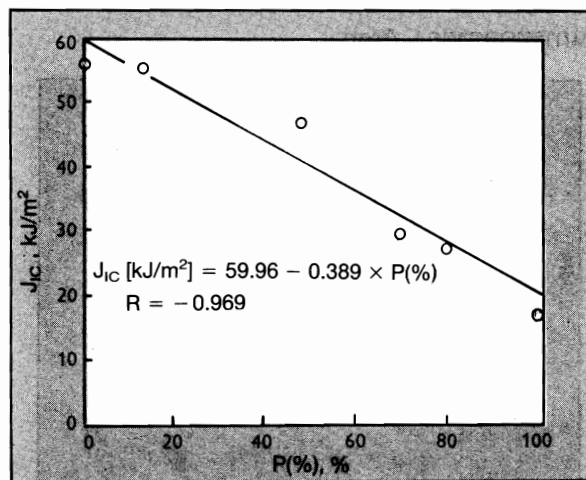
จากรูปที่ 2 ได้พบว่าค่า  $J_{in}(EP)$   $J_{in}(AE)$  ในทุก ๆ ชั้นทดสอบ จึงทำการหาค่าเฉลี่ยระหว่างค่าทั้งสองเป็น

$$\frac{J_{in}(EP) + J_{in}(AE)}{2}$$

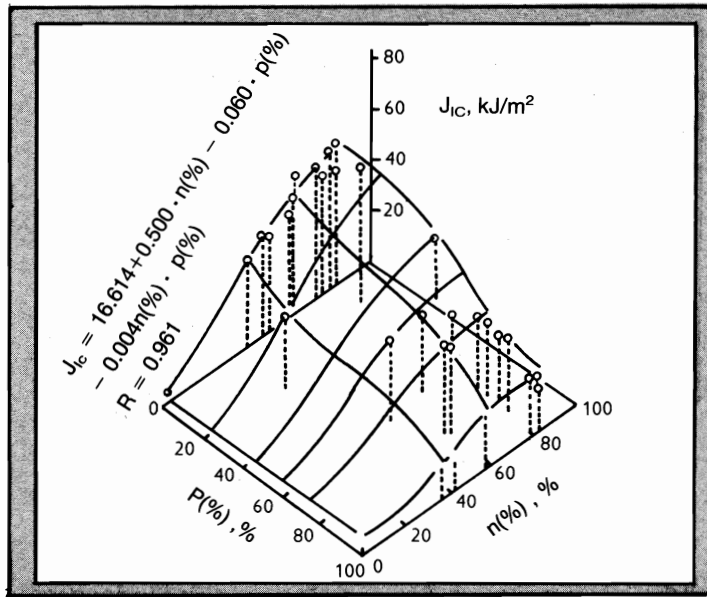
แล้วมาหาความสัมพันธ์ร่วมกับ  $J_{in}(R)$  ที่หาได้ตามรูปที่ 3 ซึ่งแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า

$$J_{in}(R) = 0.34 \frac{J_{in}(EP) + J_{in}(AE)}{2}$$

โดยไม่ขึ้นกับโครงสร้างเนื้อพื้นของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งจากรายงานฉบับที่แล้ว<sup>3)</sup> ได้แสดงไว้แล้วว่ามีความสัมพันธ์อยู่ในลักษณะเดียวกันนี้ในกรณีเนื้อพื้นเป็นเฟอไรต์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้จากกราฟรูปที่ 4 นี้ว่าความสัมพันธ์นี้เป็นจริงในกรณีที่เนื้อพื้นเป็นเพียร์ไลต์บางส่วนหรือเพียร์ไลต์ 100% ด้วย และจึงเป็นสาเหตุประการหนึ่งที่น่าเอาค่า  $J_{in}(R)$  มาใช้เป็นค่า  $J_{IC}$  ดังกล่าว



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $J_{IC}$  และปริมาณเพียร์ไลต์ของเหล็กหล่อกราไฟต์กลม nodularity 83%



### 3.2 อิทธิพลของ nodularity และปริมาณของเพียร์ไลต์ต่อค่า $J_{IC}$

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $J_{IC}$  ที่ประเมินได้จากการทดลองและค่าปริมาณของเพียร์ไลต์เพื่อ nodularity มีค่า 83% ค่า  $J_{IC}$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเพียร์ไลต์มีค่าเพิ่มขึ้น และมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเส้นตรง ด้วยสมการ

$$J_{IC} = 59.96 - 0.389 P(\%)$$

โดยมีค่า correlation Coefficient - 0.969

รูปที่ 6 เป็นกราฟ 3 มิติ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $J_{IC}$ , nodularity  $n(\%)$  และปริมาณของเพียร์ไลต์  $P(\%)$  นั้น ค่า  $J_{IC}$  จะมีแนวโน้มลดลงมาก เมื่อ nodularity มีค่าลดลง แต่ในกรณีของเนื้อพื้นเพียร์ไลต์ 90% ขึ้นไปนั้น อิทธิพลของ nodularity ต่อ  $J_{IC}$  มีไม่สูงนัก ส่วนเนื้อพื้นที่มีเพียร์ไลต์ปริมาณปานกลางนั้น ค่า  $n$  และ  $P$  จะมีอิทธิพลร่วมกันต่อค่าของ  $J_{IC}$  และสามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$J_{IC} = 16.614 + 0.500 n(\%) - 0.060 P(\%) - 0.004 n(\%) P(\%)$$

โดยมีค่า correlation Coefficient - 0.961

ในกรณีของค่า CE นั้น จะไม่มีอิทธิพลต่อค่า  $J_{IC}$  จึงไม่ได้แสดงไว้ในรูปกราฟที่ 6 นี้

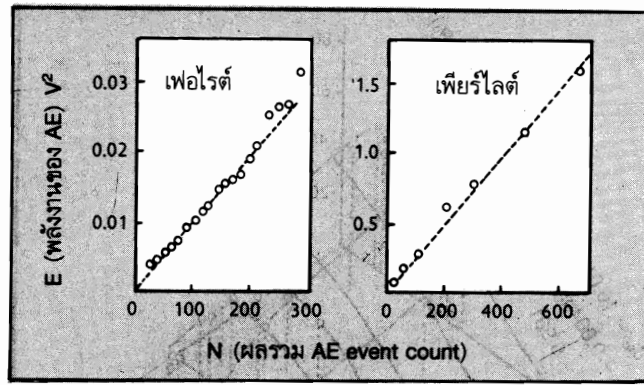
### 4. วิจัยรณผลการทดลอง

#### 4.1 วิธี AE และวิธีความต่างศักย์ไฟฟ้า

การพิจารณาค่า J-Integral จากสัญญาณ AE ในการทดลองเกี่ยวกับ Fracture Toughness มี 4 วิธี ได้แก่

1. พิจารณาจากจุดที่ผลรวม event count หรือผลรวมพลังงานมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว<sup>6),7)</sup>
2. จุดที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในการกระจายของค่า Amplitude<sup>8),9),10)</sup>
3. จุดที่เส้นโค้งระหว่าง log J-log E มีการโค้งงอขึ้น<sup>11)</sup>
4. จุดที่ Spectrum ของความถี่ของคลื่นมีการเปลี่ยนแปลง<sup>12),13)</sup>

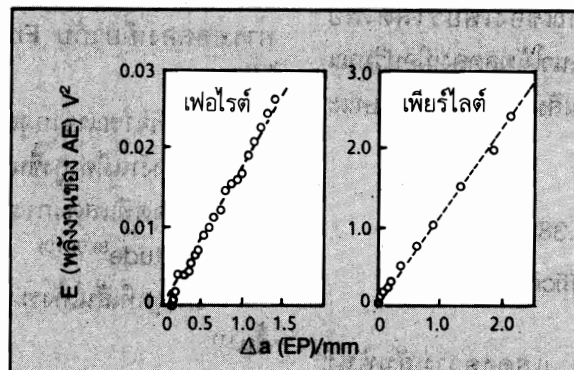
ซึ่งได้มีการรายงานไว้ในบทความต่าง ๆ ที่อ้างอิงไว้ในทั้ง 3 กรณีข้างต้นนั้น ในบทความต่าง ๆ ได้กล่าวไว้สอดคล้องกันว่า จุดที่รอยแตกเริ่มขยายตัวจาก pre-crack นั้นจะเป็นจุดที่ค่า Amplitude ของ AE มีค่าสูงขึ้นจนสังเกตเห็นได้ชัด หรือจำนวนครั้งการเกิด AE มีจำนวนมากขึ้น อย่างไรก็ตามในทั้ง 3 กรณี ยังมีปัญหาเกี่ยวกับจุดกำเนิดของ AE อยู่ และไม่ได้เกิดขึ้นในลักษณะเหมือนกันในวัสดุทุกชนิด ในกรณีที่ (4) ก็เช่นเดียวกันในวัสดุบางอย่างเกิดปรากฏการณ์ที่เป็นตรงกันข้ามก็มี ดังนั้นทั้ง 4 ข้อนี้ กล่าวได้ว่าเป็นวิธีที่ยังไม่ได้มีการยืนยันถึงความถูกต้องแน่นอนนัก ในการทดลองครั้งนี้ได้มีการพิจารณาได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของ AE และผลรวม AE event count และ  $\Delta a$  (EP)

ในกรณีของเหล็กหล่อที่มีค่า nodularity สูงนั้น ค่าพลังงานของ AE มีการแปรผันเป็นเส้นตรงกับค่าผลรวมของ AE event count ดังแสดงในรูปที่ 7 ไม่ว่าเนื้อพื้นจะเป็นเฟอไรต์หรือเพียร์ไลต์ก็มีลักษณะเป็นแบบเดียวกัน

(พลังงานจากเพียร์ไลต์จะสูงกว่าเฟอไรต์ประมาณ 100 เท่า) นอกจากนี้พลังงานจาก event แต่ละ event จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะเป็นก่อนหรือหลังรอยแตกเริ่มขยายตัว

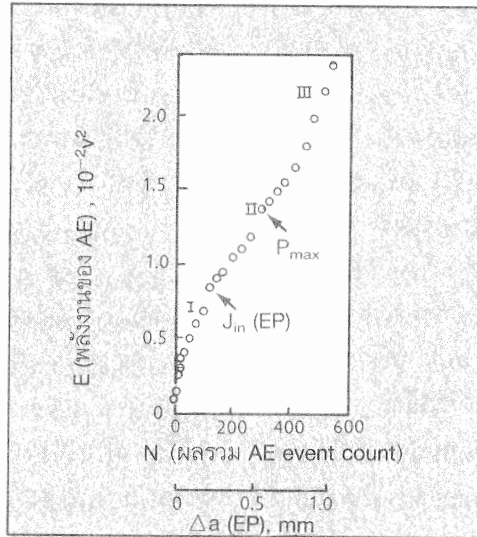


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวม AE event และ  $\Delta a$  (EP)

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของ AE และปริมาณของรอยแตกที่ขยายตัวไป  $\Delta a$  (EP) ซึ่งเห็นได้ชัดว่า พลังงาน AE แปรผันเป็นเส้นตรงกับค่า  $\Delta a$  (EP) ในกรณีของเหล็กหล่อที่มีค่า nodularity ต่ำ (51%) นี้ ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของ AE event count, พลังงานของ AE กับ  $\Delta a$  (EP) นั้น เริ่มจะไม่เป็นเส้นตรง (ดังรูปที่ 9) ช่วงก่อนถึง Jin (EP) (Zone I) และช่วงหลัง  $P_{max}$  ในส่วนที่รอยแตกขยายตัวแบบไม่สม่ำเสมอ (Zone III) นั้น จะมี AE ซึ่งมีค่า Amplitude สูงปะปนอยู่มาก โดยทั่วไปสามารถกล่าวได้ว่า สำหรับการ

ทดสอบ Fracture toughness ของเหล็กหล่อกราไฟท์ กลมนั้นค่าพลังงานของ AE จะแปรผันเป็นเส้นตรงกับผลรวมของ AE event count และค่า  $\Delta a$  (EP) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่า ในกรณีโครงสร้างที่เป็นเฟอไรต์นั้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานของ AE และ  $\Delta a$  (EP) นั้นเป็นเส้นตรงที่ไม่ได้ผ่านจุด Origin กล่าวคือไม่เห็นค่าพลังงานของ AE ที่มี  $a$  (EP) ต่ำกว่า  $100 \mu$  แต่ในกรณีของเนื้อพื้นเป็นเพียร์ไลต์หรือในกรณีที่มีค่า nodularity ต่ำนั้น (รูปที่ 9) จะไม่เห็นปรากฏการณ์นี้ชัดเจนนัก



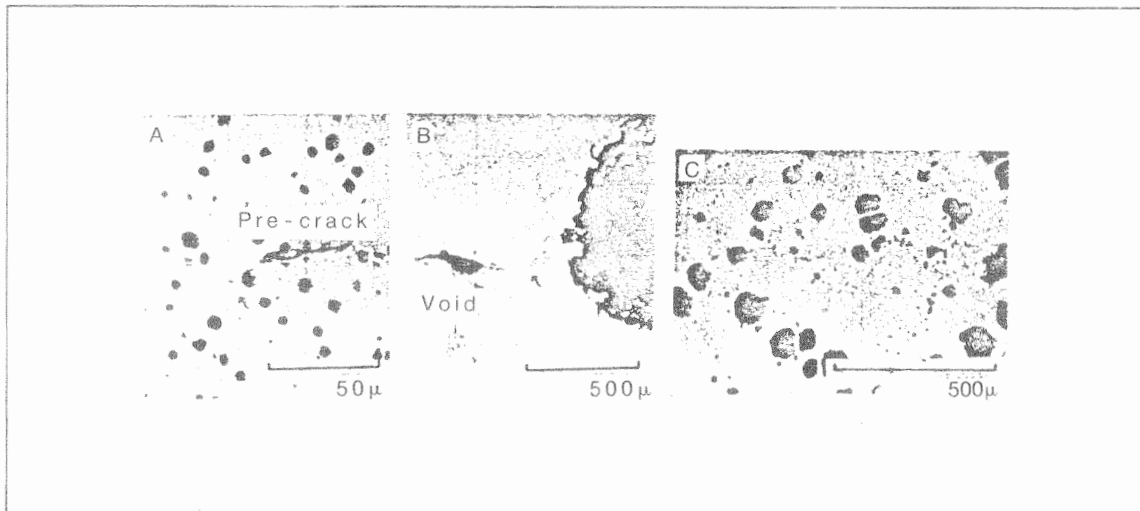


รูปที่ 9 ผลรวม AE event count, พลังงานของ AE และ  $\Delta a$  (EP) (nodularity 51% เนื้อพื้นเพอไรต์)

#### 4.2 แบบจำลองของการแตก

เมื่อจะพิจารณากลไกของการแตก ได้มีการทดลองดึงชิ้นงานที่มีเนื้อพื้นของเพอไรต์กับชิ้นงานที่มีเนื้อพื้นเพียร์ไลต์จนถึงจุดก่อนที่จะได้ค่า  $J_{IC}$  แล้วผ่าชิ้นงานออกเป็น 2 ส่วน ตามความหนา เมื่อพิจารณาครอยแตกที่เกิดขึ้นตามภาพโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 10 A, B และ C

สำหรับรูป A และ B เป็นโครงสร้างเพอไรต์ที่มีค่า  $J_{IC}$  55 KJ/m<sup>2</sup> ได้ทดลองดึงจนถึงค่า  $J = 52.4$  KJ/m<sup>2</sup> แล้วปลดแรงออก ส่วนรูป C เป็นโครงสร้างเพียร์ไลต์ ซึ่งมีค่า  $J_{IC}$  17.5 KJ/m<sup>2</sup> ทดลองจนถึงค่า  $J = 15.8$  KJ/m<sup>2</sup> แล้วปลดแรงออก



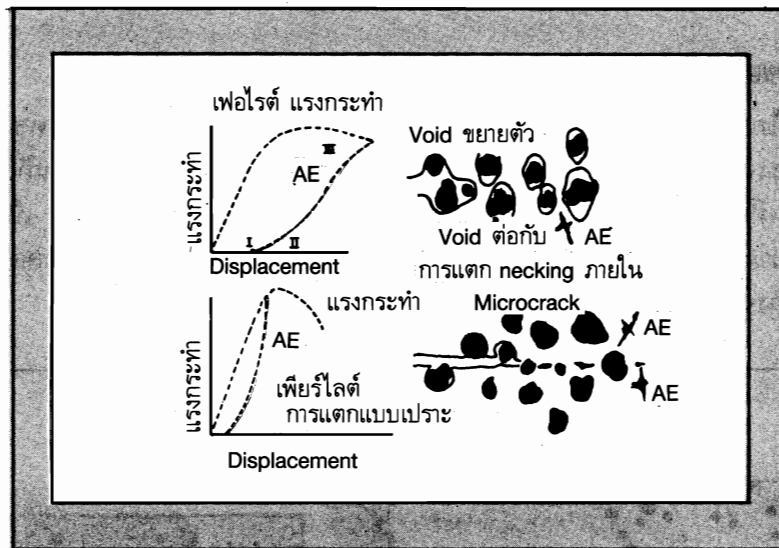
รูปที่ 10 ภาพถ่าย SEM บริเวณใกล้ปลายรอยแตก (A, B) และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ปกติ (C) (A) และ (B) เป็นภาพของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเพอไรต์ (C) เป็นภาพของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเพียร์ไลต์ ภาพทั้งหมดถ่ายจากชิ้นงานที่ปลดแรงกระทำก่อนถึงค่า  $J_{IC}$

ในกรณีของเฟอไรต์บริเวณใกล้ ๆ กับปลายของ Pre-crack นั้น จะเห็น Void โดยรอบของกราฟไฟต์ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยรอยแตก กล่าวคือ เมื่อได้รับแรงกระทำ จะเกิด Void โดยรอบกราฟไฟต์แล้วเชื่อมต่อกันทำให้รอยแตกเกิดการขยายตัวไปได้ ส่วนเพียร์ไลต์นั้นรอยแตกจะขยายตัวไปโดยไม่มีความสัมพันธ์กับกราฟไฟต์ ซึ่งกล่าวได้ว่าสำหรับเนื้อพื้นที่มีความแข็งแรงสูง แต่ Fracture Toughness ต่ำแบบเพียร์ไลต์นั้นจะเกิดการแตกแบบเปราะที่เนื้อพื้น หรือเกิด microcrack ที่ผิวระหว่างเนื้อพื้นกับกราฟไฟต์ ทำให้รอยแตกขยายตัวไปได้

แหล่งกำเนิดคลื่นเสียง AE สำหรับวัสดุเหนียวจะเกิดสภาวะแรงกระทำ 3 แกน ทำให้ plastic zone เกิดขยายตัว เกิดการแตกของ Inclusion การแยกตัวของเนื้อพื้นในลักษณะของ microcrack (เริ่มเกิด Void)

จะเกิดคลื่นเสียง AE Type I หลังจากนั้นจะเกิดการครากทั่วทั้งพื้นภาคตัดขวางเมื่อ Void เกิดการเชื่อมต่อกันซึ่งจะเกิดคลื่นเสียง AE Type II เมื่อถึงช่วงการแตกแบบไร้เสถียรภาพจะเกิดคลื่นเสียง AE Type III ขึ้น ซึ่งแสดงเป็นตัวอย่างไว้ในรูปที่ 9

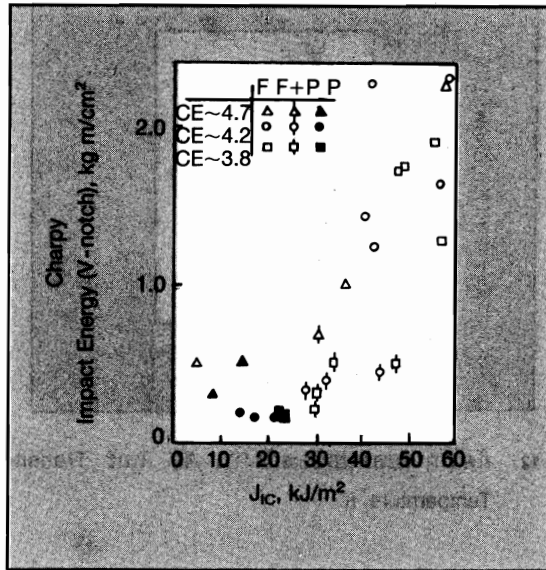
การกำหนดค่า  $J_{IC}$  นั้น จุดที่สำคัญอยู่ที่การวัดปริมาณของ AE Type I และ Type II แยกจากกัน<sup>14)</sup> ในกรณีของวัสดุเหล็กหล่อในการทดลองครั้งนี้แหล่งกำเนิด Void ซึ่งได้แก่กราฟไฟต์จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับเนื้อพื้นอย่างไม่แข็งแรง และตัวของกราฟไฟต์เองก็มีความแข็งแรงต่ำ ดังนั้น คลื่นเสียงที่เกิดจาก AE Type I จะมีปริมาณน้อยมาก และจากการทดลองตรวจวัดครั้งนี้ จะเห็นได้ว่าผลรวมของ AE event count จะแปรผันตรงกับค่าของ  $\Delta a$  (EP)



รูปที่ 11 แบบจำลองของการแตก

จากเหตุผลทั้งหมดข้างต้น AE ที่ตรวจวัดได้จากการทดลองครั้งนี้ขึ้นกับการขยายตัวของรอยแตกเป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของเนื้อพื้นเฟอไรต์จะไม่เกิด

AE จาก microcrack แต่จะสามารถวัด AE Type II ได้จากการเชื่อมต่อกันของ Void ผลสรุปทั้งหมดแสดงเป็นแบบจำลองของการแตกไว้ในรูปที่ 11



รูปที่ 13 พลังงานจากการทดสอบแรงกระแทก (บากร่องรูปตัว V) และ  $J_{IC}$

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานจากการทดสอบแรงกระแทกกับค่า  $J_{IC}$  กล่าวโดยทั่วไปได้ว่า ค่าพลังงานจากการทดสอบแรงกระแทกมีความสัมพันธ์แปรผันกับค่า  $J_{IC}$  แต่เมื่อพิจารณาโดยละเอียดจะเห็นได้ว่า  $J_{IC}$  จะมีความสัมพันธ์อย่างมากกับเนื้อพื้นเพอไรต์ซึ่งมีค่าของความแกร่งสูง ส่วนเพียร์ไลต์ที่มีค่าความแกร่งต่ำนั้น ค่าพลังงานจากการทดสอบแรงกระแทกเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับค่า  $J_{IC}$  ซึ่งแปรผันเป็นช่วงกว้าง ซึ่งเหตุผลของปรากฏการณ์นี้เป็นสิ่งที่น่าจะได้มีการพิจารณาต่อไปในอนาคต

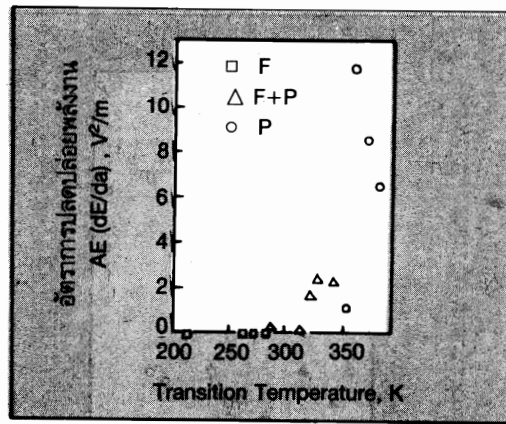
## 5. บทสรุป

การทดลองครั้งนี้ได้ทำการประเมินค่า Elastic-Plastic Fracture Toughness โดยวิธีความต่างศักย์ไฟฟ้า (EP) และวิธีอคูสติก อิมิสชัน (AE) กับชิ้นงานทดสอบเหล็กหล่อที่มีกราฟไฟต์รูปทรงต่างๆ กัน จากรูปเกล็ด CV จนถึงรูปทรงกลม และเนื้อพื้นที่มีปริมาณเพียร์ไลต์ต่างๆ กันจาก 0 (100% เพอไรต์) จนถึง 100% ผลลัพธ์ที่ได้พอสรุปได้ดังนี้ :-

1. ค่า  $J_{IC}$  ที่ประเมินได้จากจุดเพิ่มสูงขึ้นของค่าผลรวม AE event count และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือ  $J_{in}$  (AE) และ  $J_{in}$  (EP) นั้นมีค่าใกล้เคียงกันและค่าทั้งสองนั้นมีความสัมพันธ์กับค่า  $J_{in}$  (R) ซึ่งประเมินจากจุดตัดของ Blunting Line ที่เขียนจากเส้นโค้ง

## 4.3 ค่าพลังงานจากการทดสอบแรงกระแทกแบบ CHARPY

ค่าพลังงานจากการทดสอบแรงกระแทกแบบ CHARPY มักจะใช้เป็นพารามิเตอร์ในการประเมินค่าความแกร่งอยู่เสมอ ดังนั้นจึงได้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่านี้ (โดยขึ้นทดสอบบากร่องตัว V) กับค่าของ AE กับ  $J_{IC}$  ที่ประเมินได้ ในการทดลองครั้งนี้ รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Transition Temperature จากการทดสอบแรงกระแทกกับอัตราการปลดปล่อยพลังงานของ AE หรือพลังงาน AE ต่อหน่วยความยาวของรอยแตก ( $dE/da$ )



รูปที่ 12 อัตราการปลดปล่อยพลังงาน AE และ Transition Temperature, K

ในกรณีของเพียร์ไลต์ซึ่งมีค่า Transition Temperature สูงกว่าอุณหภูมิห้องนั้น จะมีการปลดปล่อยพลังงาน AE ในอัตราสูง ส่วนเฟอไรต์ซึ่งมีค่า Transition Temperature ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องจะปลดปล่อยพลังงาน AE ในอัตราที่ต่ำ จึงเข้าใจได้ว่าการแตกแบบพลาสติกจะทำให้เกิดพลังงาน AE ที่มีค่าสูง ซึ่งสอดคล้องกับข้อวิจารณ์ที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมาแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรอยแตกที่เพิ่มขึ้น  $a$  (EP) (ที่ประเมินจากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น) กับค่า  $J$  ซึ่งตัดกับเส้นโค้ง R ความสัมพันธ์ดังกล่าวเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$J_{in}(R) = 1.34 J_{in}(AE) = 1.34 J_{in}(EP)$$

ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับเหล็กหล่อกราไฟต์ ซึ่งมีเนื้อพื้นมีปริมาณเพียร์ไลต์ต่างๆ กัน จากการทดลองครั้งนี้

2. สามารถใช้ค่า  $J_{in}(R)$  เป็นค่า  $J_{IC}$  ได้
3. ค่า  $J_{IC}$  ของเฟอไรต์นั้นจะลดลงเมื่อ nodularity มีค่าลดลง ส่วนเพียร์ไลต์นั้นอิทธิพลของ nodularity ต่อค่า  $J_{IC}$  มีน้อยเมื่อเทียบกับกรณีของเฟอไรต์
4. ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $J_{IC}$  nodularity  $n(\%)$  และปริมาณเพียร์ไลต์ในเนื้อพื้น  $P(\%)$  เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$J_{IC} = 16.614 + 0.500 n(\%) - 0.060 P(\%) - 0.004n(\%) P(\%)$$

### เอกสารอ้างอิง

1. G.A. Aronson, R.O. Ritchie : J. Testing and Evaluation, 7 (1979), 208.
2. ASTM Standard, E 813-81.
3. K. Kuribayashi, T. Kishi, P. Bhandhubanyong, M. Itoh, T. Umeda, Y. Kimura : Tetsu to Hagane, 69 (1983), 663.
4. ASTM Standard, E 399, 74
5. Nihon Kikai Gakkai Kijun JSME-Sa 001-80
6. D. Dilipkuman, W.E. Wood : Experimental Mechanics, 19 (1979), 416.
7. W.W. Gerberich, D.G. Atteridge, J.F. Lessar : Met Trans. A., 6A (1975), 797.
8. G. Clark, J.F. Knott : Metal Science, 11 (1979), 531.
9. T. Kishi, Saito, Mishima, Horiuchi : Nihon Kikai Gakkai Koen Rombun Shu 780-9, (1978), 81.
10. Kikuchi : Tohoku Daigaku Gakkai Rombun, (1980).
11. L.J. Graham, G.A. Alers : Materials Evaluation, 32-2 (1974), 31.
12. Niisuma, Takahashi, Nakahari : Hihagai Kensa, 30 (1981), 903.
13. K. Kuribayashi, T. Kishi : Tetsu to Hagane, 67 (1981), A 109.