การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติวัสดุเชิงกลระหว่าง Specimen และ Bar System ต่อการทดสอบการกดด้วยเทคนิค Split Hopkinson Pressure Bar

ฐิตะพล หุยะนันท์* และ วชิระ พุ่มพวง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ 10530
* ติดต่อ: โทรศัพท์: 083 430 0404, โทรสาร: 02 988 3666 ต่อ 3103
E-mail: thitaphol.huyanan@gmail.com

บทคัดย่อ

Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติเชิงพลวัตของวัสดุที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดต่อเวลาสูง (10^2 s^{-1}~10^4 s^{-1}) เทคนิคนี้ถูกพัฒนาบนทฤษฎีการแผ่ของคลื่นความเค้นอัดตามยาวจากการเข้ากระแทกของ Striker Bar กับ Pressure Bar คู่ที่มีชิ้นงานทดสอบ (Specimen) วางอยู่ระหว่างกลาง โดยความเครียดที่วัดได้จาก Pressure Bar ทั้งสองจะถูกนำไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติเชิงพลวัตของ Specimen ต่อไป เนื่องจากความแตกต่างของคุณสมบัติวัสดุเชิงกลระหว่าง Bar System และ Specimen เป็นปัจจัยสำคัญต่อการวิเคราะห์หาคุณสมบัติเชิงพลวัตของ Specimen ด้วยเทคนิคนี้ ดังนั้น บทความนี้จึงนำเสนอแนวทางการกำหนด Mechanical Properties Matching ระหว่าง Bar System และ Specimen ผ่านการจำลองทางไฟไนต์อิลิเมนต์ของการกดทดสอบด้วยเทคนิค SHPB ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดต่อเวลาสูง ณ อุณหภูมิห้อง ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ภายใต้การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดต่อคุณลักษณะของคลื่นความเค้นอัดตามยาวที่แผ่ใน Bar System และ Specimen ผลการจำลองการทดสอบการกดด้วย Striker Bar, Pressure Bar คู่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 mm ความยาว 0.33 m และ 1.2 m ตามลำดับ และ Specimen ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.3 mm ยาว 8.3 mm จากโลหะต่างๆ 9 ชนิด ณ อัตราความเครียดเป้าหมาย $4x10^3$ s^{-1}, $8x10^3$ s^{-1} และ 10^4 s^{-1} ตามลำดับ พบว่า ค่าความเค้นคราก (Yield Stress, σ_0) คือปัจจัยที่ส่งผลกระทบมากที่สุดในการทดสอบการกดด้วยเทคนิค SHPB โดย Specimen ควรมีค่า Yield Stress ต่ำกว่า 8 เท่าของ Pressure Bar ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าทฤษฎีอยู่ในช่วง 3%~25% จึงจะสามารถนำ Reflected Wave และ Transmitted Wave จากการทดสอบไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติเชิงพลวัตได้ต่อไป

คำหลัก: Split Hopkinson Pressure Bar, Mechanical Properties Matching, Finite Element Simulation

Abstract

Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) is a testing technique to determine dynamic properties of materials at high strain rates ($10^2 s^{-1}$~$10^4 s^{-1}$). This technique was developed on a theory of compressive stress wave propagation caused by an impact of a striker bar to a bar system which is holding a specimen between both pressure bars. Dynamic properties of the specimen are then obtained via an analysis of measured strains from the pressure bars. Since a difference between mechanical properties of

the bar system and the specimen is the most important for determining the dynamic properties with this technique. As a result, this paper presents a guideline for mechanical properties matching between the bar system and the specimen via a series of compressive testing simulations based on SHPB technique at room temperature with high strain rates. Commercial FE software is employed to study effects of a change in strain rate on characteristics of an elastic strain wave propagating in the AISI4340 bar system and nine different metals as the specimens. Simulation results were obtained from the compressive tests at targeted strain rates $\dot{\varepsilon}$ of $4x10^3 s^{-1}$, $8x10^3 s^{-1}$ and $10^4 s^{-1}$ using the 6.3mm diameter and 8.3mm length specimens and the 9.5 mm diameter bar system whose lengths of the striker bar and the pressure bars are 0.33m and 1.2m respectively. It was found that a yield stress σ_0 is the most crucial effect for the compressive SHPB test. The yield stress of specimen should not exceed 8 times of the pressure bars' which enables to the further analysis of dynamic properties determination with given 3%~25% errors compared to the theoretical calculation.

***Keywords**:* Split Hopkinson Pressure Bar, Mechanical Properties Matching, Finite Element Simulation

1. บทนำ

เทคนิค SHPB ใช้สำหรับวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของวัสดุ ณ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดต่อเวลาสูง (High Strain Rate) ที่ 10^2 s^{-1}~10^4 s^{-1} จากการเข้ากระแทกของ Striker Bar กับชุด Bar System คู่ ซึ่งประกอบด้วย Incident Bar และ Transmitted Bar ที่มีชิ้นงานทดสอบ (Specimen) วางอยู่ระหว่างกลางที่อัตราเร็วสูงภายใต้หลักการแผ่ของคลื่นความเครียด (Strain Wave) ตามยาวใน 1 มิติ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเลือกวัสดุที่ใช้ทำ Bar System ในแต่ละครั้งนั้นอาจแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุของ Specimen เช่น ในปี 1996 Lee และ Lin [1] ทดสอบหาคุณสมบัติเชิงพลวัติของ Tungsten Ti-6A1-4V โดยใช้ Bar System ทำจาก Steel DC53 (DIDO), ในปี 2003 Lee และ Kim [2] ทำการกดทดสอบ Aluminum Alloy- PMMA โดยใช้ Bar System ทำจากโลหะ STB2, ในปี 2009 ฐิตะพลและคณะ [3] ได้ทำการกดทดสอบทองแดง 99.98% ด้วย Bar System ทำจาก Steel AISI 4340

ดังนั้นบทความฉบับนี้จึงนำเสนอการศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติวัสดุเชิงกลระหว่าง Specimen ที่ทำจากโลหะ 9 ชนิด และ Bar System ที่ทำจาก Steel AISI 4340 ผ่านการจำลองทางไฟไนต์อิลิเมนต์ของการกดทดสอบด้วยเทคนิค SHPB ที่ Strain Rate สูง ณ อุณหภูมิห้อง ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป จากนั้นนำผลที่ได้จากการจำลองไปวิเคราะห์ร่วมกับการพิจารณาค่าสัดส่วนของ Yield Stress และ Wave Impedance ของวัสดุ เพื่อนำไปหาแนวทางจับคู่คุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม (Mechanical Properties Matching) สำหรับการกดทดสอบวัสดุในลำดับต่อไป

2. คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุและทฤษฎี SHPB

การทดสอบการกดด้วยเทคนิค SHPB เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของวัสดุซึ่งตั้งอยู่บนหลักการการเคลื่อนที่ของ Elastic Wave ใน 1 มิติ ดังที่ Kolsky [4,5] ได้พิสูจน์เอาไว้ว่าสามารถศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุที่มี Strain Rate สูง โดยการกดทดสอบด้วย Elastic Bar ดังนั้นคุณสมบัติเชิงกลพื้นฐานจึงมีผลต่อการแผ่ของคลื่นที่เกิดขึ้น

2.1 คุณสมบัติเชิงกลพื้นฐานของวัสดุ

คุณสมบัติเชิงกลพื้นฐานของวัสดุที่พบในตารางโลหะทั่วไปมีค่าต่างๆ หลากหลาย แต่ใน

บทความนี้จะพิจารณาเฉพาะคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับเทคนิค SHPB เท่านั้น โดยที่การแผ่ของคลื่นใน Bar System จะเกี่ยวข้องกับ ความหนาแน่น (ρ) และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ขณะที่การเสียรูปถาวรของ Specimen จะเกิดหลังจากความเค้นสูงกว่าค่าความเค้นคราก (Yield Stress, σ_0) ของมัน

2.1.1 Wave Impedance

เนื่องจาก Bar System และ Specimen ที่นำมาทดสอบนั้น มีความแตกต่างกันในเรื่องชนิดของวัสดุและ/หรือขนาดพื้นที่หน้าตัด ดังนั้น จึงเกิดความไม่ต่อเนื่องของตัวกลาง ซึ่งเป็นผลทำให้มีความต้านทานการแผ่ของ Strain Wave เกิดขึ้นที่บริเวณนั้น โดยคุณสมบัตินี้ จะเรียกว่า Wave Impedance หาได้จาก

$$Z_G = \rho c A = ZA \qquad (1)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วคลื่นในวัสดุ (โดย $c = \sqrt{E/\rho}$) และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ขณะที่พจน์ของ ρc นั้นรู้จักกันในชื่อว่า Acoustic Impedance (Z) ของวัสดุ เพราะฉะนั้น ความไม่ต่อเนื่องของการแผ่ของคลื่นสามารถแสดงได้ด้วยค่า Wave Impedance Ratio, n_G ดังสมการ

$$n_G = \frac{Z_{G1}}{Z_{G2}} = \frac{Z_1 A_1}{Z_2 A_2} \qquad (2)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์การสะท้อน ณ บริเวณนั้นสามารถหาได้จาก

$$R_{coef} = \frac{1-n_G}{1+n_G} \qquad (3)$$

คลื่นสะท้อนของ Incident Wave จะเกิดภายใต้การเสียรูปไม่เกิน Proportional Limit ของ Incident Bar ซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการ

$$\varepsilon_r = R_{coef}.\varepsilon_i = R_{coef}.\frac{\rho_0 V c_0}{2E_0} \qquad (4)$$

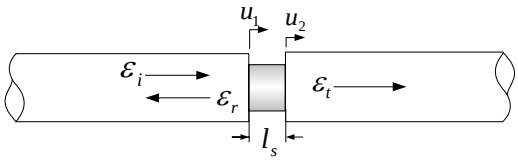
เมื่อ ρ_0 คือ ความหนาแน่นของ Bar System, V คือ อัตราเร็วเข้ากระแทกของ Striker Bar, c_0 คือความเร็วคลื่นใน Bar System, E_0 คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ Bar System โดยที่ Amplitude (ε_i) และ Pulse Width (Δt) ของ Incident Strain Pulse หาได้จาก

$$\varepsilon_i = \frac{\rho_0 V c_0}{2E_0} \text{ และ } \Delta t = \frac{2l_{st}}{c_0} \qquad (5)$$

เมื่อ l_{st} คือ ความยาวของ Striker Bar

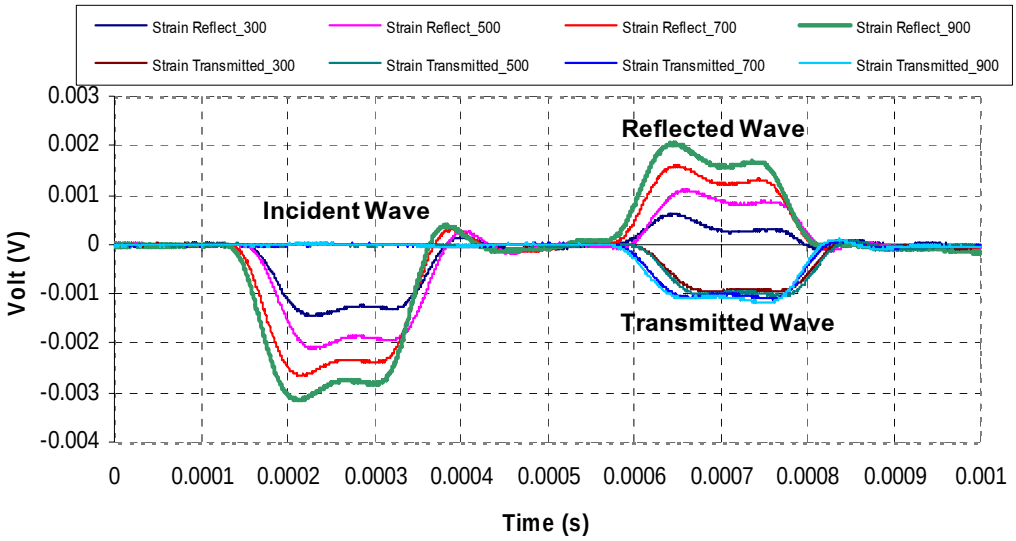
2.2 ทฤษฎี SHPB

เทคนิค SHPB ของการกดทดสอบเริ่มจากการยิง Striker Bar เข้ากระแทก Incident Bar ที่มี Sensor ทำหน้าที่วัดความเร็วก่อนเข้ากระแทกของ Striker Bar ติดไว้ระหว่าง Striker Bar และ Incident Bar มี Specimen ที่ทำด้วยโลหะวางอยู่ระหว่าง Incident Bar และ Transmitted Bar ณ อัตราเร็วต่างๆ โดยติด Strain Gage สำหรับวัดค่า Strain ที่เกิดขึ้นในระบบไว้ระหว่าง Incident Bar และ Transmitted Bar ซึ่ง Bar ทั้งสามนี้ ทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน, มีความแข็งมากกว่าวัสดุที่ใช้ทำ Specimen และอยู่ในตำแหน่งร่วมศูนย์กัน แต่เงื่อนไขของการกระแทกระหว่าง Bar นั้น จะต้องไม่ให้ Pressure Bar เสียรูปเกินกว่า Proportional Limit ของมัน เนื่องจากถ้าหาก Pressure Bar เกิดการเสียรูปแล้ว การทดสอบนี้จะถือว่าล้มเหลว



รูปที่ 1 การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นที่เกิดขึ้นในระบบ SHPB

Strain Wave จะแผ่ไปตลอดความยาวของ Pressure Bar หลังการกระแทกและเกิดการส่งผ่านรวมถึงการสะท้อนกลับของ Strain Wave [6] โดย Strain Wave ที่เกิดขึ้นใน Incident Bar คือ Incident Wave (ε_i) และ Reflected Wave (ε_r) ส่วนคลื่นใน Transmitted Bar คือ Transmitted Wave (ε_t) (ดังรูปที่ 1) โดยสามารถบันทึกสัญญาณของ Incident Wave, Reflect Wave และ Transmitted Wave ที่เกิดขึ้น (ดังรูปที่ 2) ผ่าน Strain Gauge ที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของ Pressure Bar ทั้งสอง [3]



รูปที่ 2 คลื่นที่บันทึกได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค SHPB

การทดสอบการกดด้วยเทคนิค SHPB นั้นจะใช้สมมติฐานว่า Specimen เกิดการเสียรูปแบบ Uniform ภายใต้สมดุลย์แรง โดยสมการสำหรับหาค่า Strain Rate $\dot{\varepsilon}_s(t)$, Strain $\varepsilon_s(t)$, และ Stress $\sigma_s(t)$ ที่เกิดใน Specimen ได้จากเทคนิควิเคราะห์ 2 แบบ คือ การวิเคราะห์แบบ 3 คลื่น และ การวิเคราะห์แบบ 1 คลื่น (ซึ่งนักวิจัยส่วนใหญ่ในปัจจุบันนิยมกัน) ดังนี้

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{2c_0}{l_s}\varepsilon_r(t)$$

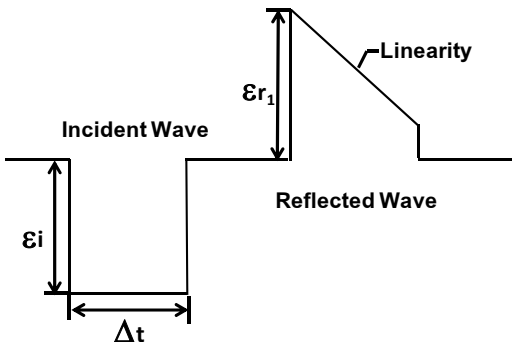
$$\varepsilon_s(t) = \frac{2c_0}{l_s}\int_0^t \varepsilon_r(t)dt$$

$$\sigma_s(t) = \frac{A_0}{A_s}E_0\varepsilon_t(t)$$

เมื่อ l_s คือ ความยาวของ Specimen, A_0 และ A_s แทน พื้นที่หน้าตัดของ Pressure Bar และ Specimen ตามลำดับ จะเห็นว่า $\varepsilon_r(t)$ คือคลื่นที่ใช้วิเคราะห์หาค่า $\dot{\varepsilon}_s$ และ ε_s ขณะที่ $\varepsilon_t(t)$ ใช้หา σ_s เมื่อพิจารณาการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นจากรูปที่ 1 และจากสมมติฐานที่ว่า Specimen อยู่ในสภาวะสมดุลย์แรงซึ่งเป็นผลให้ Transmitted Wave เท่ากับผลรวมของ Incident Wave และ Reflected Wave $(\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t)$ ดังนั้นเมื่อนำความสัมพันธ์นี้แทนกลับไปยังสมการด้านบน จะได้สมการการหา σ_s ในพจน์ของ ε_i และ ε_r ดังนี้

$$\sigma_s(t) = \frac{A_0}{A_s}E_0(\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t))$$

ทางทฤษฎี Reflected Wave $\varepsilon_r(t)$ ซึ่งถูกกำหนดลักษณะจำเพาะตามสมการที่ (4) นั้นเกิดมาจากการสะท้อนกลับของ Incident Wave $\varepsilon_i(t)$ ณ รอยต่อระหว่าง Incident Bar และ Specimen ซึ่ง Incident Wave นี้มีลักษณะจำเพาะทางทฤษฎีตามสมการที่ (5) เป็นคลื่นดลสี่เหลี่ยมที่มีแอมปลิจูด ε_i และความกว้าง Δt คงที่ จากสมการที่ (4) เมื่อ Specimen เสียรูปภายใต้การกดในระหว่างการส่งผ่านและการสะท้อนกลับของ Incident Wave ทำให้พื้นที่หน้าตัดของมันเพิ่มขึ้นอันเป็นผลให้แอมปลิจูดของ ε_r ลดต่ำลงจากค่าเริ่มต้น ε_{r1} โดยขนาดของ Amplitude ของ $\varepsilon_r(t)$ ขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวัสดุ (R_{coef}) ดังสมการที่ (3) และจากสมมติฐานที่ว่า Specimen เกิดการเสียรูปแบบ Uniform ตลอดระยะความกว้างคงที่ Δt ส่งผลให้ $\varepsilon_r(t)$ ลดลงอย่างเชิงเส้น (ดังรูปที่ 3)



รูปที่ 3 คลื่นทางทฤษฎี

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่นำมาจำลองเป็น Specimen

Material	ρ (kg/m^3)	E (GPa)	c_0 (m/s)	Z (x10^{6}kg/m^{2}s)	σ_0 (MPa)
Aluminium-AA6082-T6	2,700	70	5,091.75	13.7	428.5
Tungsten Alooy	1,930	410	14,575.16	28.1	1,506
Copper OFHC	8,940	128	3,783.87	33.8	90
Steel A36	7,850	200	5,047.54	39.6	41.5
s-7 Tool Steel	7,750	207	5,168.14	40.1	1,539
Steel 4340	7,850	208	5,147.51	40.4	792
Armco Iron	7,892	211	5,170.68	40.8	175
Steel 1045	8,030	210	5,113.90	41.1	553
Nickel	8,900	220	4,971.83	44.2	163

สมมติฐานนี้เป็นจะจริงเมื่อ Bar System เสียรูปภายใต้ช่วง Proportional Limit และวัสดุทั้งหมดเป็นแบบ Homogenous เท่านั้น

3. การจำลองการกดทดสอบด้วยเทคนิค SHPB

ในการออกแบบการจำลองการกดทดสอบด้วยเทคนิค SHPB ของบทความนี้ จะพิจารณาถึงคุณสมบัติเชิงกลพื้นฐานของโลหะที่นำมาใช้เป็น Specimen ที่แตกต่างกัน 9 ชนิด ประกอบด้วย Aluminum Alloy-AA 6082-T6, Tungsten Alloy, Copper OFHC, Steel A36, s-7 Tool Steel, Steel AISI 4340, Armco Iron, Steel 1045 และ Nickel ขณะที่กำหนดให้ Bar System ทำจาก Steel AISI 4340 เท่านั้น ซึ่งวัสดุทั้งหมดสามารถหาค่าคงที่ของ Johnson-Cook Model [8] ได้ การศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติวัสดุเชิงกลระหว่าง Specimen กับ Bar System ทำผ่านการจำลองทางไฟไนต์อิลิเมนต์ของการกดทดสอบที่ Strain Rate สูง ณ อุณหภูมิห้องด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

3.1 เงื่อนไขของการจำลองการทดสอบ

การออกแบบการจำลองการทดสอบการกดด้วยเทคนิค SHPB นั้น จะใช้ Steel AISI 4340 ในการจำลองเป็น Bar System และใช้โลหะ 9 ชนิดจำลองเป็น Specimen ซึ่งในการจำลองการทดสอบจะเปลี่ยนแปลงค่า V , ขนาดความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของ Bar System และ Specimen แสดงดังตารางที่ 1, คุณสมบัติเชิงกลพื้นฐาน [8-10] ของวัสดุที่ใช้ แสดงดังตารางที่ 2 โดยค่า Z ของวัสดุแต่ละชนิดหาได้จากสมการที่ (1)

ตารางที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาว

Dimension (mm.)	Striker Bar	Incident Bar	Specimen	Transmitted Bar
Diameter	9.5	9.5	6.3	9.5
Length	330	1,200	8.3	1,200

บทความนี้สนใจศึกษาเปรียบเทียบลักษณะจำเพาะของ Strain Wave ที่เกิดบน Incident Bar ที่ Strain Rate 4,000 s^{-1}, 8,000 s^{-1} และ 10,000 s^{-1} ซึ่งได้อัตราเร็วเข้ากระแทกค่าต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 ตามแนวทางการคำนวณของ ฐิตะพลและคณะ [3],[6] กับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี เพื่อนำไปวิเคราะห์หาแนวทางในการจับคู่คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่เหมาะสมในลำดับต่อไป

ตารางที่ 3 ค่าอัตราเร็วเข้ากระแทก

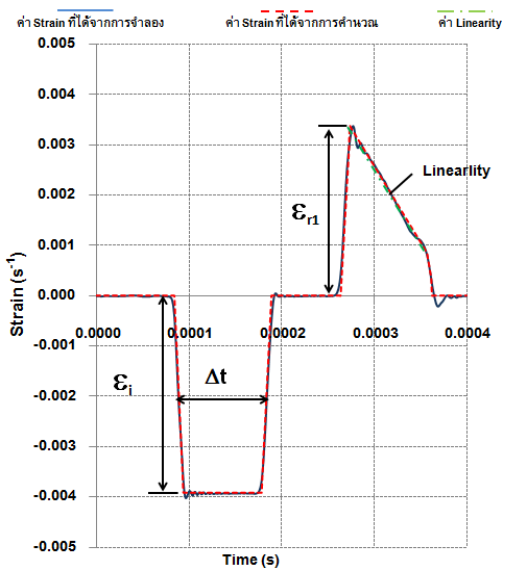
Strain Rate (s^{-1})	V (m/s)
4,000	16
8,000	32
10,000	40

3.2 การวิเคราะห์และการประเมินผล

การวิเคราะห์และการประเมินผลที่ได้จากการจำลองการทดสอบการกดด้วยเทคนิค SHPB ในบทความนี้จะวิเคราะห์กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ

คลื่นกับเวลาจากการจำลองการกดทดสอบชนิด โดยวิเคราะห์ Incident Pulse เพื่อหาค่า ε_i และ Δt ส่วน Reflected Pulse จะถูกวิเคราะห์เพื่อหาค่า ε_{r1} และ Linearity of Deformation (R^2) แสดงดังรูปที่ 4 แล้วนำเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎีในรูปของค่าความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีของ ε_i, Δt, และ ε_{r1} ซึ่งแทนด้วย $\in_{\varepsilon_i}$, $\in_{\Delta t}$, และ $\in_{r_1}$ ดังสมการข้างล่างตามลำดับ

$$\in = \left(\frac{Value_{Simulation} - Value_{Theory}}{Value_{Theory}} \right) x100$$



รูปที่ 4 การวิเคราะห์ค่า ε_i, Δt, ε_{r1} และ R^2 ที่ได้จากการจำลองเทียบกับค่าที่คำนวณทางทฤษฎี

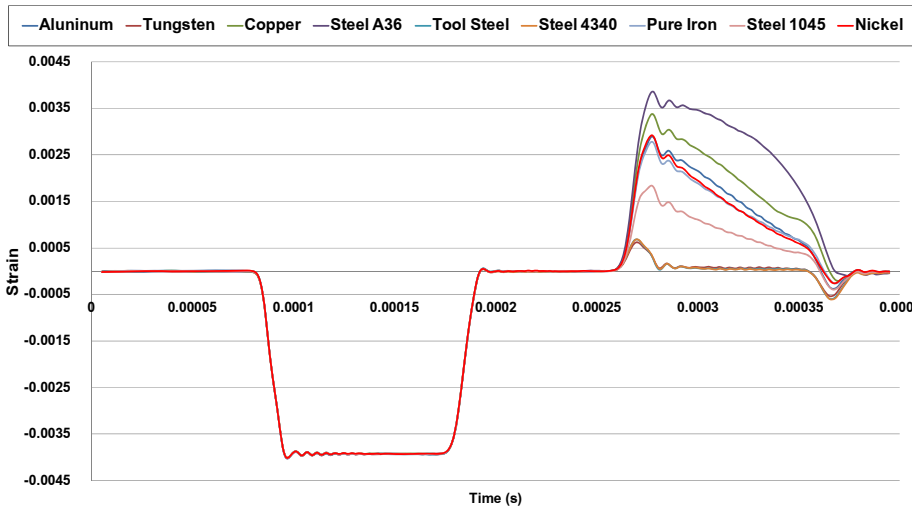
แล้วจะพิจารณาวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีที่ได้กับผลกระทบคุณสมบัติเชิงกลพื้นฐานของวัสดุที่มีผลต่อการกดทดสอบด้วยเทคนิค SHPB ในรูปของสัดส่วน Yield Stress และ Wave Impedance Ratio ในลำดับต่อไป

4. ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผล

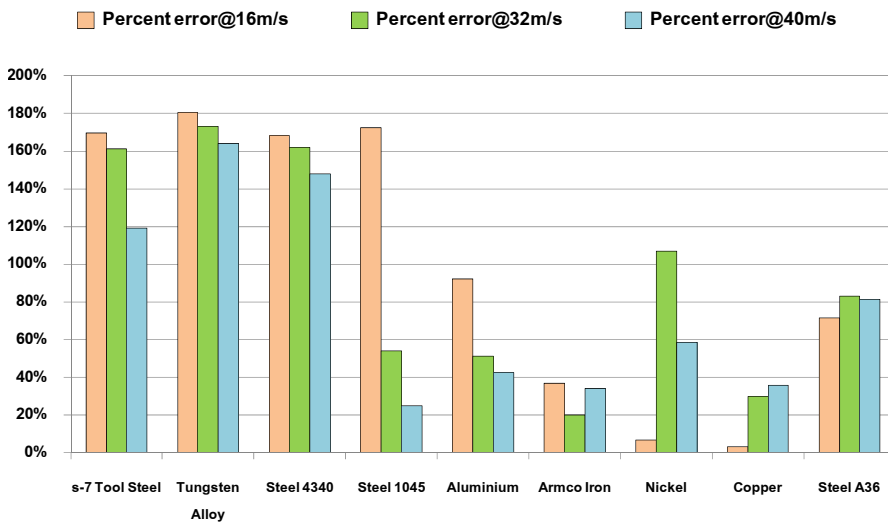
จากการจำลองการทดสอบการกด ณ Strain Rate ที่ 4,000 s^{-1}, 8,000 s^{-1} และ 10,000 s^{-1} โดยทำการจำลองที่วัสดุที่ใช้ทำ Specimen ต่างกัน 9 ชนิดที่อัตราเร็วเข้ากระแทก 16 m/s, 32 m/s และ 40 m/s จะได้ค่า ε_i, Δt, ε_r และ R^2 ซึ่งนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎีโดยค่า ε_i และ Δt หาได้จากสมการที่ (4) ,ค่า ε_{r1} หาได้จากสมการที่ (3), ตัวอย่างคลื่น ε_i และคลื่น ε_{r1} ที่ได้จากการจำลองการกดทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งจากการเปรียบเทียบแนวโน้มความคลาดเคลื่อนที่ได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าสัดส่วน Yield Stress (σ_{01}/σ_{02}) และ Wave Impedance Ratio (n_G) แสดงดังรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ พบว่า วัสดุที่มีค่า Yield Stress สูง จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่สูงเกินกว่า 120% ยิ่งทดสอบที่ Strain Rate น้อย ค่าความคลาดเคลื่อนยิ่งมาก ส่วนวัสดุที่มีค่า Yield Stress ที่ต่ำมาก จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 75%

5. สรุปผลการจำลองการกดทดสอบ

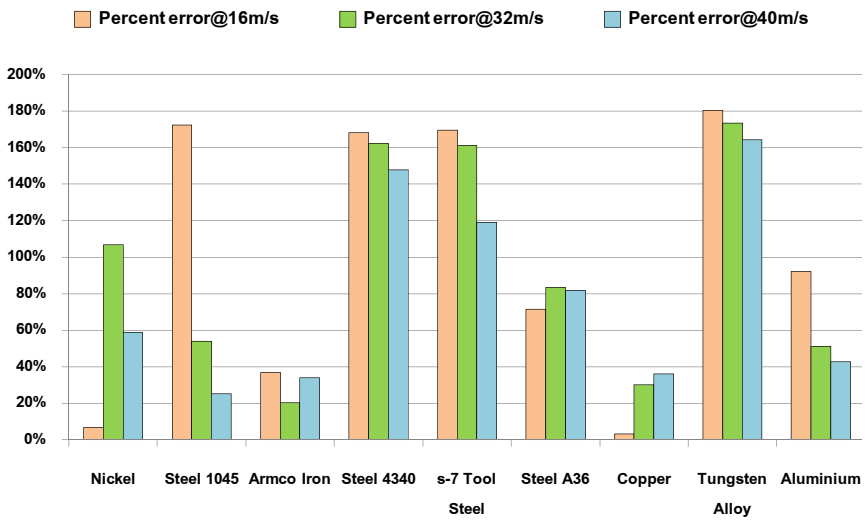
จากการจำลองการกดทดสอบเพื่อศึกษาแนวทางจับคู่คุณสมบัติเชิงกล ซึ่งพิจารณาจากคุณสมบัติเชิงกลพื้นฐานของวัสดุคือ ความหนาแน่น, ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่า Yield Stress เพื่อวิเคราะห์ค่า ε_i, Δt, ε_{r1} และ R^2 เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีด้วยเทคนิค SHPB โดยใช้ Specimen ที่ทำจากโลหะ 9 ชนิดที่ Strain Rate สูงสุด 10,000 s^{-1} ที่อัตราเร็วเข้ากระแทกของ Striker Bar เป้าหมายที่ 16 m/s, 32 m/s และ 40 m/s ซึ่งเทียบได้กับค่า Strain Rate ที่ 4,000 s^{-1}, 8,000 s^{-1} และ 10,000 s^{-1}-ตามลำดับ ได้ค่าความคลาดเคลื่อนการจำลองเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีดังรูปที่ 6 และ 7 พบว่า วัสดุที่มีค่า Yield Stress สูงเมื่อเทียบกับวัสดุ Steel AISI 4340 ที่ใช้ทำ Bar System คือ s-7 Tool Steel และTungsten Alloy มีค่าความคลาดเคลื่อนของการกดทดสอบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎีอยู่ที่ 148%~180% ส่วนวัสดุอื่นมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 3.23%~172.52% โดยวัสดุที่ทำเป็น Specimen จำลองการกดทดสอบที่อัตราเร็วเข้ากระแทก 16 m/s ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ Copper ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 3.23% วัสดุที่ทำเป็น Specimen จำลองการกดทดสอบที่อัตราเร็วเข้ากระแทก 32 m/s ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด คือ



รูปที่ 5 Incident Wave และ Reflect Wave ที่ได้จากการจำลอง ณ Strain Rate 10,000 s^{-1}



รูปที่ 6 ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการจำลองเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเรียงลำดับตาม $\frac{\sigma_{01}}{\sigma_{02}}$



รูปที่ 7 ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการจำลองเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเรียงลำดับตาม n_G

Armco Iron ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 20.18% และ วัสดุที่ทำเป็น Specimen จำลองการกดทดสอบที่อัตราเร็วเข้ากระแทก 40 m/s ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ Steel 1045 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 25.03%

จึงสรุปได้ว่า Yield Stress (σ_0) คือ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบมากที่สุด ดังนั้นแนวทางการจับคู่คุณสมบัติเชิงกลสำหรับการกดทดสอบด้วยเทคนิค SHPB ระหว่าง Bar System และ Specimen ผ่านการจำลองการกดทดสอบด้วยเทคนิค SHPB ที่ Strain Rate สูง ณ อุณหภูมิห้องคือ Specimen ควรมีค่า Yield Stress ต่ำกว่า 8 เท่าของ Pressure Bar ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าทฤษฎีอยู่ในช่วง 3%~25% จึงจะสามารถนำ Reflected Wave และ Transmitted Wave ไปใช้วิเคราะห์หาคุณสมบัติพลวัตต่อไปได้

เอกสารอ้างอิง

[1] W.S. Lee and C.F. Lin, “Plastic deformation and fracture behavior of Ti-6Al-4V alloy loaded with high strain rate under various temperatures”, Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, 10th March 1997

[2] O.S. Lee and M.S. Kim, “Dynamic material property characterization by using split Hopkinson pressure bar (SHPB) technique”, Nuclear Engineering and Design 226 (2003) 119-125

[3] ฐิตะพล หุยะนันท์ และ เอกวัฒน์ นิลวิจิตร, “อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติเชิงพลวัตของวัสดุด้วยเทคนิค Split Hopkinson Pressure Bar”, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่

[4] M.A. Kaiser, “Advancements in the Split Hopkinson Bar Test”, M.Sc Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University

[5] W. Lili, “Foundations of Stress Waves First Edition 2007”, Elsevier BV, 2007

[6] กฤษฎา บุญศิริ และ ฐิตะพล หุยะนันท์, “การจำลองการทดสอบคุณสมบัติเชิงจลน์ของวัสดุด้วยเทคนิค Split Hopkinson Pressure Bar’’, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต 17 ตุลาคม 2551

[7] K.F. Graff, “Wave Motion in Elastic Solid”, Reprint, Dover Publications, Inc.,

[8] G.R. Johnson and W.H. Cook, “Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressure”, Honeywell Inc., Defense Systems Division and Air Force Armament Laboratory, U.S.A.

[9] C. Poizat, L. Campagne, L. Daridon, S. Ahzi, C. Husson and L. Merle, “Modeling and Simulation of Thin Sheet Blanking Using Damage and Rupture Criteria”, Institut de Mecanique des Fluides et des Solides, UMR 7507 CNRS Universite Louis Pasteur/UFR IPST-France.

[10] S.P.F.C. Jaspers and J.H. Dautzenberg, “Material behavior in conditions similar to metal cutting: flow stress in the primary shear zone”, Department of Mechanical Engineering, Section Materials Technology, Eindhoven University of Technology, Netherlands, 21th November 2001