

การจำลองเชิงตัวเลขการปะทะกันของกระสุนปืนกับแผ่นเกราะเซรามิก/โลหะ Numerical Simulation of Ceramic/Metallic Armor Plate Subjected to Ballistic Impact

วิษณุพงศ์ ตะเคียน^{1,*} และ ชัยณรงค์ ศรีกุลวงศ์¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

*E-mail: wisanupongt@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์: 087 2390 626, เบอร์โทรสาร: 02 5869 541

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันวัสดุเซรามิกเข้ามามีบทบาทและถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุแผ่นเกราะ สำหรับเกราะบุคคลและยานยนต์หุ้มเกราะกันอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติประการสำคัญของเซรามิกคือความเค้นอัดมีค่ามากและมีน้ำหนักเบา ซึ่งเป็นข้อดีของวัสดุเซรามิกที่เหนือกว่าโลหะ ข้อจำกัดประการสำคัญของเกราะโลหะคือมีน้ำหนักมากทำให้ผู้สวมใส่ขาดความคล่องตัวหรือความสามารถในการเคลื่อนที่ลดลง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากลไกการเจาะทะลุของกระสุนปืนกับเกราะเซรามิก-แผ่นโลหะโดยใช้เทคนิคจำลองความเสียหายแบบ Smooth particle hydrodynamics (SPH) ของการปะทะของกระสุนกับแผ่นเกราะที่ความเร็วสูงทั้งนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการออกแบบแผ่นเกราะชนิดนี้ รวมถึงเปรียบเทียบผลการจำลองการปะทะที่ได้จากโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบจริง

คำหลัก: แผ่นเกราะ, การวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์, เกราะเซรามิก

Abstract

Recently, ceramics play a significant role in the armor design and widely used as the front plate in ceramic/composite or ceramic/metallic layered plate armor system for both personal body armor and military/civilian armored vehicle. For personal body armor design, weight and compressive strength of the front plate are the prime parameters in selecting an effective armor material. Evidently, ceramics offer required dominant properties in high compressive strength, fracture toughness and relative low density and therefore can be considered as one of the most appropriate armor materials to meet these constrained specification comparing to other metallic materials.

In this paper, the numerical model using the smooth particle hydrodynamics (SPH) technique applied studying the penetration and damage mechanism of the hypervelocity projectile in the ceramic/metallic armor system is presented. Additionally, the validation between the experimental and computational results is made in order to check the reliability of the model.

Keywords: Armor plate, finite element analysis, ceramic materials

1. บทนำ

(Introduction)

จากข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยออกแบบเสื้อเกราะ [1] พบว่า การเลือกวัสดุเกราะ ความหนาของแผ่นเกราะ แต่ละชั้น มีความสำคัญมากต่อสมรรถนะการป้องกัน กระสุนของเกราะ ในทางปฏิบัติการออกแบบเสื้อเกราะ จะต้องทำการยิงทดสอบทำลายเสื้อเกราะ ทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณการวิจัยเป็นจำนวนมากไปกับการทดสอบดังกล่าว

อภิชาติและคณะ [2] ได้พบว่า มีความเป็นไปได้ที่จะศึกษาพารามิเตอร์การออกแบบเสื้อเกราะขั้นต้นโดยใช้ระเบียบวิธีการคำนวณขั้นสูงแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะสามารถศึกษาผลกระทบการเกิดความเสียหายขณะที่กระสุนกระทบและทะลุแผ่นเกราะได้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบโดยใช้ กระสุนปืน .44 กับเกราะโลหะและอ้างอิงมาตรฐานการยิงทดสอบ NIJ [3] ระดับ 3A ซึ่งกำหนดค่าการยุบตัวของเกราะที่ยอมรับได้

โดยทั่วไป พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการออกแบบเกราะ ได้แก่ คุณสมบัติวัสดุเกราะ [4-6] กลไกการเจาะทะลุ [7-9] ความเร็วต้นของกระสุน [10] รูปร่างหัวกระสุน ความแข็งของแผ่นเกราะ และการจัดวางเรียงซ้อนกันของแผ่นเกราะ

ความเร็วต้นกระสุนถือว่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากในการออกแบบเสื้อเกราะเนื่องจากเป็นตัวกำหนดหรือบ่งบอกถึงพลังงานจลน์ของการปะทะ อาทิเช่น ความเร็วต้นของกระสุนปืนพกขนาด .44 คือ 450 เมตรต่อวินาที [10] เป็นต้น

คุณสมบัติวัสดุจัดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากเช่นกัน [4-6] โดยวัสดุที่เลือกใช้ต้องเป็นวัสดุที่แข็งแรงและยึดตัวได้ดีสามารถจัดหาได้ง่ายและมีราคาไม่แพง มีน้ำหนักเบา มีอายุการใช้งานยาวนาน ดังนั้นแผ่นโลหะจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ โดยนำแผ่นเกราะโลหะมาจัดเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ ซึ่งแผ่นเกราะชั้นแรกทำหน้าที่ทำลายหัวกระสุน แผ่นเกราะชั้นที่สองดูดซับพลังงานจลน์ส่วนที่เหลือของกระสุน

รูปร่างหัวกระสุนส่งผลต่อกลไกการเจาะทะลุและแรงต้านอากาศพลศาสตร์ที่กระทำขณะกระสุน

เคลื่อนที่ รูปแบบการเสียหายของรูกระสุนจะแตกต่างกันและขึ้นอยู่กับรูปแบบหัวกระสุนเป็นสำคัญ ตามที่ระบุในเอกสาร [7-9]

2. ทฤษฎีพื้นฐานและสมการคณิตศาสตร์

(Fundamental and Mathematic Formulation)

สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการปะทะแบบพลศาสตร์ (Impact Dynamics) ของซอฟต์แวร์ ANSYS ถูกเลือกใช้ในงานวิจัยนี้ โมดูลที่เลือกใช้คือ Explicit Dynamics ซึ่งประกอบไปด้วย สมการกฎทรงมวล การอนุรักษ์โมเมนตัม และการอนุรักษ์พลังงาน โดยการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ อันประกอบไปด้วย การสร้างแบบจำลองแผ่นเกราะและกระสุน การกำหนดแบบจำลองความเสียหายของวัสดุ ข้อมูลคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ การกำหนดความเร็วต้นของกระสุน การจับยึดของแผ่นเกราะ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ เป็นต้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

กฎทรงมวล:

$$\rho = \frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V} \quad (1)$$

กฎทรงมวล ใช้ในการกำหนดมวลรวมก่อนเข้าปะทะต้องเท่ากับมวลรวมภายหลังการปะทะ โดย ρ_0 คือ ความหนาแน่นเริ่มต้น หรือ ก่อนการปะทะ (kg/m^3)

ρ คือ ความหนาแน่นที่เวลาใดๆ (kg/m^3)

m_0 คือ มวลเริ่มต้น หรือ ก่อนการปะทะ (kg)

m คือ มวลที่เวลาใดๆ ซึ่งต้องเท่ากับ m_0 ก่อนการปะทะ (kg)

V_0 คือ ปริมาตรเริ่มต้นก่อนการปะทะ (m^3)

V คือ ปริมาตรที่เวลาใดๆ (m^3)

การอนุรักษ์โมเมนตัม:

การอนุรักษ์โมเมนตัมนี้เชื่อมโยงแรงกระทำกับความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุดังนี้

$$\text{แรงในแนวแกน } x \quad \rho \ddot{x} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \quad (2.1)$$

$$\text{แรงในแนวแกน } y \quad \rho \ddot{y} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \quad (2.2)$$

แรงในแนวแกน z $\rho \ddot{z} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}$ (2.3)

โดย

$\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ คือ ความเร็วในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ (m/s²)

σ_{ij} คือ เทนเซอร์อันดับสองของความเค้นในทิศทางต่างๆ (Pa หรือ MPa)

สมการการอนุรักษ์พลังงาน:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{xz} \dot{\epsilon}_{xz})$$
 (3)

โดย

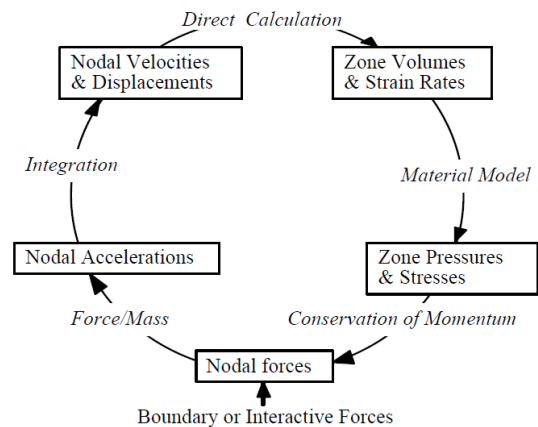
$\dot{e}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานต่อเวลา (J/s)

$\dot{\epsilon}_{ij}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดต่อเวลา (s⁻¹) จะพบว่าพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุคือ Strain Energy Rate

2.1 วัฏจักรการคำนวณของลากรานจ์

(Lagrange Computation Cycle) [11]

วัฏจักรการคำนวณของลากรานจ์ดังรูปที่ 1 เริ่มต้นจากนำแรงปฏิกิริยาหรือแรงกระทำที่ขอบของโครงแบบจำลองหรือชิ้นงานซึ่งแรงดังกล่าวทำให้เกิดความเร่งที่ Node หลังจากนั้นนำความเร่งมาคำนวณหาความเร็วหรือระยะจัดของ Node นั้นๆ โดยการอินทิเกรตค่าความเร่ง ผลที่ได้คือปริมาตรและอัตราความเครียดที่เปลี่ยนแปลงไปของแบบจำลอง ต่อจากนั้นความเครียดก็จะเป็นอินพุตในสมการความแข็งแรงของวัสดุ ผลลัพธ์ที่ได้ คือการเปลี่ยนแปลงของความเค้นกับความดันในแบบจำลอง ซึ่งความเค้นที่ได้ถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาแรงกระทำที่ Node โดยผ่านสมการ การอนุรักษ์โมเมนตัม อีกต่อหนึ่ง เมื่อวัฏจักรครบรอบ การคำนวณของลากรานจ์ก็จะวนต่อไปเรื่อยๆ

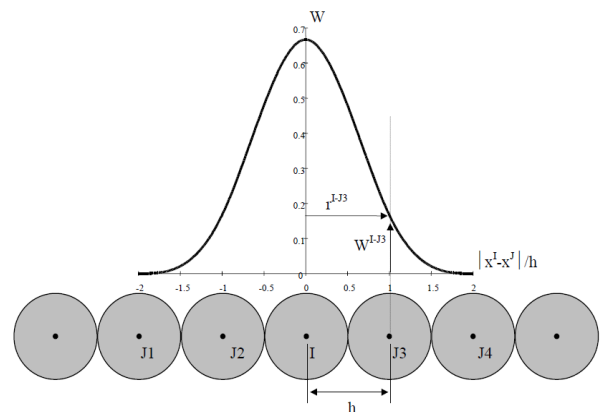


รูปที่ 1 วัฏจักรการคำนวณของลากรานจ์ในโมดูล Explicit dynamics [11]

2.2 ทฤษฎีของ Smooth particle hydrodynamics

อนุภาคแบบ SPH ถูกออกแบบมาสำหรับจำลองการปะทะของวัตถุที่ความเร็วสูง ซึ่งเอลิเมนต์ของชิ้นงานเกิดการฉีกขาดหรือแตกเสียหายอย่างมาก (Dynamic fracture) เช่น การประลัยของเซรามิก

ฟังก์ชันน้ำหนักแบบเคอร์เนล (W^I) ที่ใช้นำเสนอในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความหนาแน่นอนุภาคของเคอร์เนล [13] ความหนาแน่นของอนุภาคสามารถอธิบายได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\rho^I = \sum_{j=1}^N m^J W^{JJ}(X^I - X^J, h)$$
 (4)

เมื่อ

m^J คือ มวลของอนุภาค J

W^{JJ} คือ ฟังก์ชันน้ำหนักแบบเคอร์เนล B-spline

x คือ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของอนุภาค

h คือ ความยาวตามแนวแกน หรือขนาดของอนุภาค

การคำนวณค่าฟังก์ชันของอนุภาค I ในกรณีความหนาแน่น จะรวมค่าฟังก์ชันที่อนุภาคข้างๆ ทั้งหมด (อนุภาคข้างเคียงที่ J_1, J_2, J_3, J_4 เป็นต้น) คูณกับฟังก์ชันน้ำหนักเคอร์เนล

3.การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

(Finite Element Model Construction)

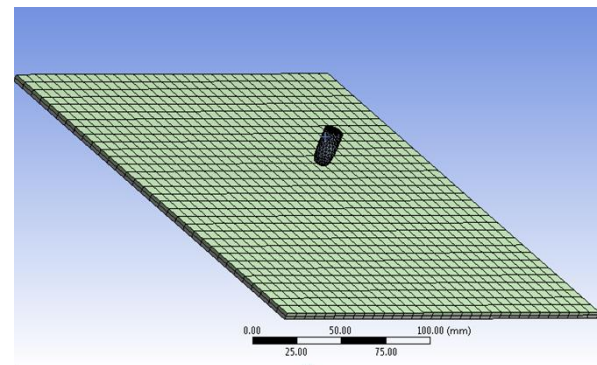
วัสดุและขนาดวัสดุที่ใช้ในการทดสอบถูกแสดงในตารางที่ 1 สำหรับแผ่นเกราะและกระสุน โดยค่าคุณสมบัติหรือโมเดลของวัสดุต่างๆ จะต้องถูกกำหนดลงในโปรแกรมการคำนวณ

ตารางที่ 1 ข้อมูลเกราะและกระสุนที่ได้จากการทดสอบจริงและนำมาสร้างเป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

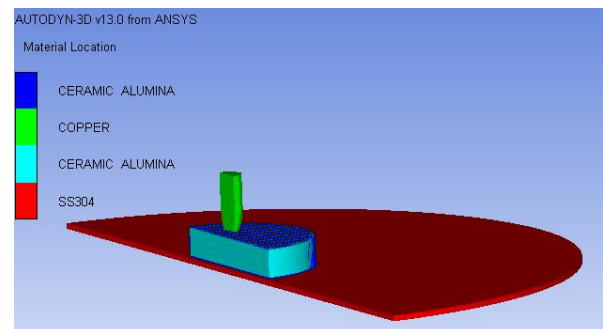
กระสุนปืน	.44FMJ
วัสดุกระสุน	ทองแดง-copper alloy
ขนาด	ขนาด 250 × 250 มม.
เกราะ	
การจัดเรียงแผ่นเกราะ	รูปแบบที่ 1 @ เหล็กกล้าไร้สนิม เกราะแผ่นหน้า และอลูมิเนียม เกราะแผ่นหลัง รูปแบบที่ 2 @ เซรามิกเกราะ แผ่นหน้าและ เหล็กกล้าไร้สนิม เกราะแผ่นหลัง

ขนาดแบบจำลองแผ่นเกราะและกระสุนปืนได้วัดขนาดจากชิ้นงานสื่อเกราะจริง แล้วนำมาสร้างในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างเอลิเมนต์ (Meshing) ที่ถูกต้องและมีความละเอียดสูง จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าความถูกต้อง ในที่นี้ใช้เอลิเมนต์ปริซึมแบบสี่เหลี่ยมที่มีขนาดเอลิเมนต์ 1, 1.5 และ 2 มม. ตามลำดับ พบว่าเอลิเมนต์ขนาด 1 มม. ให้ผลลัพธ์สำหรับการยุบตัวของแผ่นเกราะเหล็กกล้าไร้สนิม/อลูมิเนียมดีที่สุดและเทียบเท่ากับผลการทดลองจริงสำหรับเซรามิกขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 2 มม. ก็เพียงพอที่จะให้ค่าการยุบตัวที่ดีที่สุดสำหรับแผ่นเกราะเซรามิก/เหล็กกล้าไร้สนิม

แบบจำลองที่สร้างขึ้นถูกนำเสนอในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 3 แบบจำลองแผ่นเกราะเหล็กกล้าไร้สนิม/อลูมิเนียมและกระสุน (Lagrangian computation)



รูปที่ 4 แบบจำลองแผ่นเกราะเซรามิก-เหล็กกล้าไร้สนิม และกระสุน (SPH computation)

ตารางที่ 2 อิทธิพลของขนาดเอลิเมนต์ต่อรอยยุบตัวกรณีจำลองกระสุนปืน .44 ที่ความเร็วต้น 450 m/s โดยใช้ ANSYS – Explicit (Lagrange computation)

Incident angle (deg.)	Mesh (mm)	Armor configuration	Indentation on backing plate (mm)
90	2	SS(3)+Al(2)	13.69
90	1.5	SS(3)+Al(2)	16.45
90	1	SS(3)+Al(2)	17.36

ผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงค่าความลึกรอยบุ๋มของเกราะดังแสดงในตารางที่ 2 โดย

ทำการเปรียบเทียบความหนาและลักษณะการจัดวาง
ซ้อนกันของแผ่นเกราะ

ตารางที่ 3 อิทธิพลของมุมปะทะต่อรอยยุบตัว กรณี
จำลองกระสุนปืน .44 ที่ความเร็วต้น 450 m/s โดย
ANSYS – AUTODYN (SPH Computation)

Incident angle (deg.)	Mesh (mm)	Armor configuration	Indentation on backing plate (mm)
90	2	Al ₂ O ₃ (10)+SS(2)	16.14
60	2	Al ₂ O ₃ (10)+SS(2)	14.52
30	2	Al ₂ O ₃ (10)+SS(2)	4.47

เมื่อ

SS(3) = เหล็กกล้าไร้สนิม หนา 3 มม.

SS(2) = เหล็กกล้าไร้สนิม หนา 2 มม.

Al(2) = อลูมิเนียมอัลลอย หนา 2 มม.

Al₂O₃(10) = อลูมินา หนา 10 มม.

จากผลการจำลองในตารางที่ 3 พบว่าหากมุม
ปะทะน้อยกว่า 90 องศา หรือกระสุนตกกระทบกระทำ
แบบไม่ตั้งฉากกับเกราะ การยุบตัวของเกราะก็จะ
น้อยลง

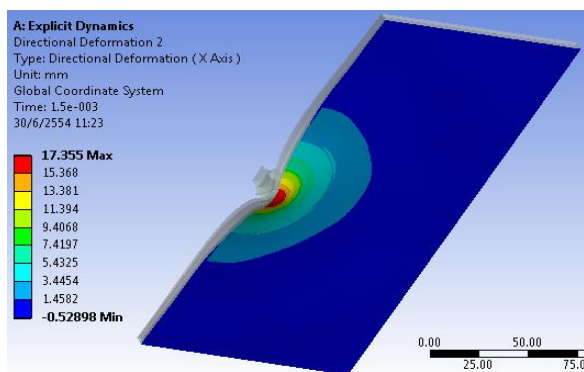
4. ผลการทดลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

(Results and Discussion)

4.1 ผลการวิเคราะห์เหล็กกล้าไร้สนิมหนา 3 มม.

กับอลูมิเนียมหนา 2 มม.

โมเดล Johnson-Cook มีค่าความใกล้เคียงและ
เหมาะสมสำหรับแบบจำลองเกราะป้องกันกระสุนปืน
พิกที่เป็นโลหะ

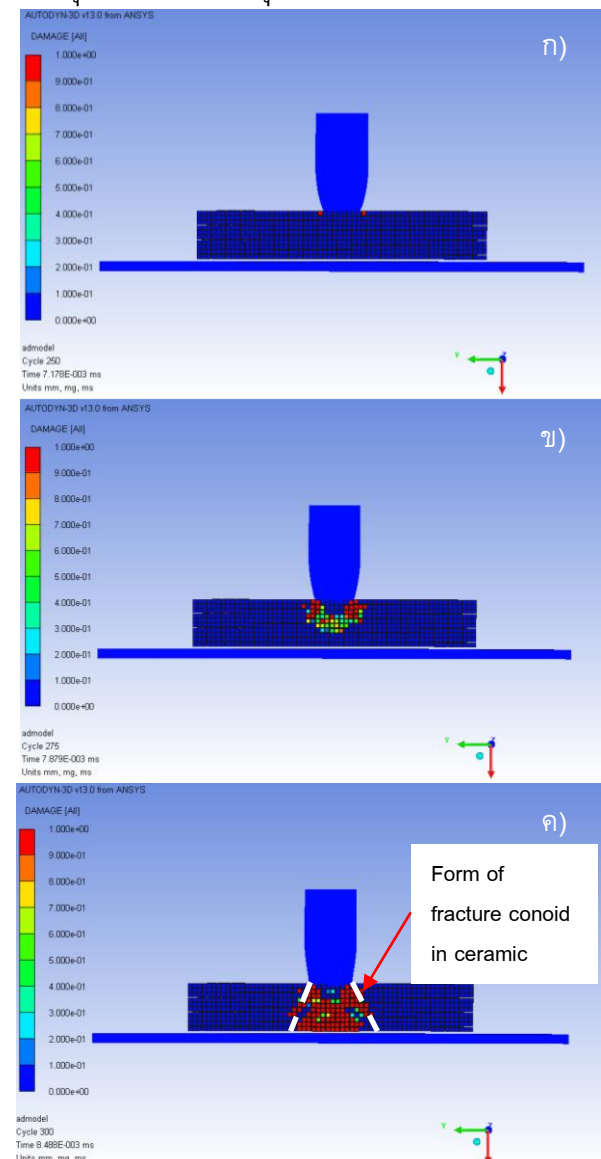


รูปที่ 5 Directional Deformation รอยยุบตัวมากที่สุด
คือ 17.36 มม.

จากรูปที่ 5 สำหรับเอลิเมนต์ขนาด 1 มม. แผ่นเกราะ
เหล็กกล้าไร้สนิม/อลูมิเนียมและกระสุน (Lagrangian
computation) เมื่อเปรียบเทียบกับผลทดลองจริงจึง
เลือกใช้โมเดล Johnson-Cook มีรอยยุบตัว ที่ 17.36
มม.

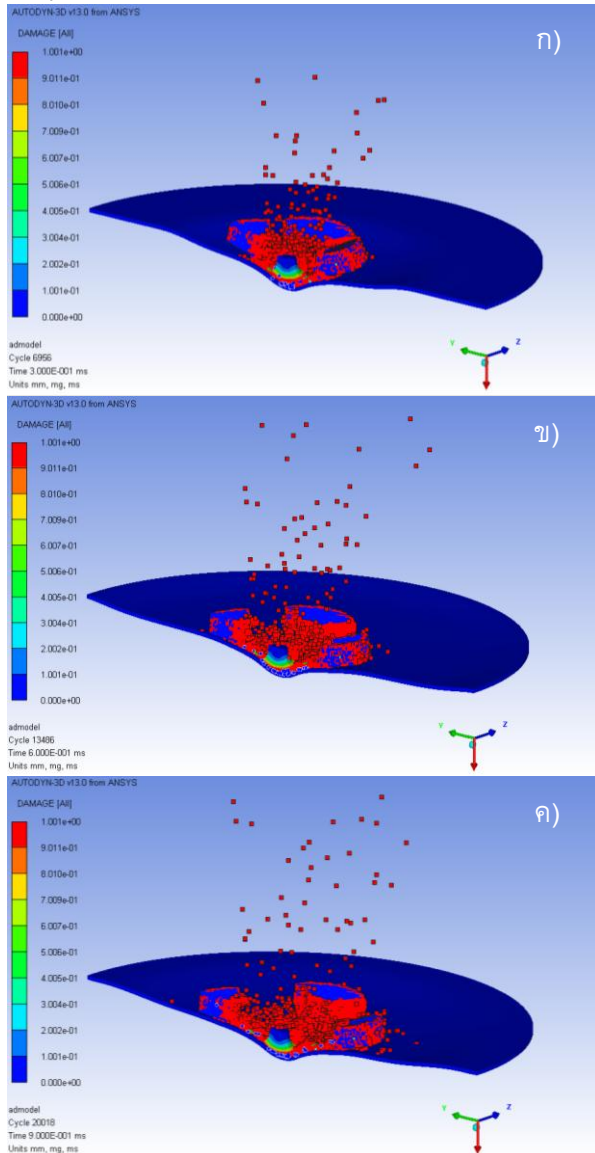
4.2 ผลการวิเคราะห์แผ่นเกราะอลูมินาหนา 10 มม./เหล็กกล้าไร้สนิมหนา 2 มม.

แผ่นเกราะเซรามิก-เหล็กกล้าไร้สนิม และกระสุน
ยิงที่มุม 90 องศา กระสุนปืน .44 และเกราะ 2 ชั้น



รูปที่ 6 รูปแบบความเสียหายของเซรามิก ก) กระสุน
เริ่มกระทบแผ่นเซรามิก ข) เซรามิกเริ่มเกิดความ
เสียหาย ค) ภาควัดแสดงความเสียหายของเซรามิกที่
เป็นเกราะแผ่นหน้า

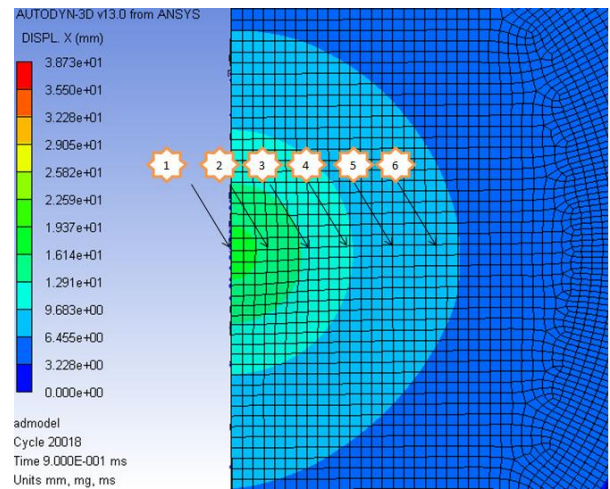
เกราะแผ่นหน้าเป็นวัสดุเซรามิก หนา 10 มม. เกราะแผ่นหลังเป็นวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 2 มม. โดยรูปที่ 6 และ 7 นำเสนอกลไกการเจาะทะลุของกระสุนในวัสดุเซรามิก



รูปที่ 7 รูปกระสุนปืนกับเกราะเซรามิก ก) กระสุนเริ่มกระทบกับแผ่นเซรามิก ข) เกิดการยุบตัวมากที่สุดที่เกราะแผ่นหลัง ค) การแตกของเซรามิกและการดีดกลับคืนรูป (Spring-back effect) ของเกราะโลหะ

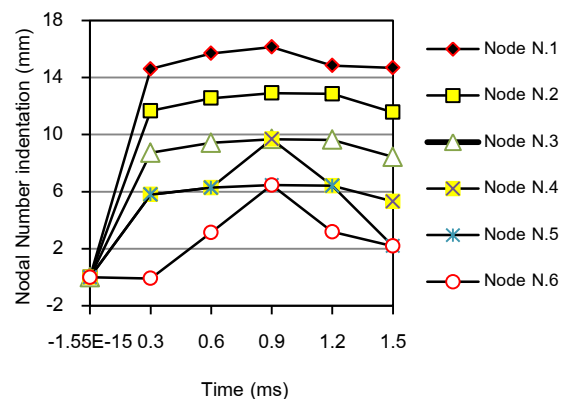
โมเดลวัสดุที่ใช้คือ Johnson-Holmquist model สำหรับเซรามิกและ Johnson-Cook model สำหรับโลหะ [11,12] ศึกษาการยุบตัวมีผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง ดังรูปที่ 7 แสดงถึงความลึกการ

ยุบตัวของชุดเกราะขนาด 16.14 มม. ที่มุม 90 องศา ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง



รูปที่ 8 ตำแหน่งของ Node ตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเกราะ

ตำแหน่งต่างๆ บนแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นจากตำแหน่งศูนย์กลางการปะทะไปในแนวรัศมีถูกนำเสนอในรูปที่ 8 จะพบว่าเมื่อกระสุนตกกระทบ Node หมายเลข 1 ซึ่งอยู่ตรงกลางของเกราะจะมีการยุบตัวมากที่สุด โดย Node ถัดไปจะมีรอยยุบตัวลดลงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ค่าการยุบตัวของแต่ละ Node ตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเกราะ

5. ผลการทดลองยิงทดสอบตามมาตรฐาน (Standard firing test-NIJ standard-0101.06)

5.1 ผลการทดลอง

รูปที่ 10 แสดงการติดตั้งแผ่นเกราะกับกระเบดินน้ำมัน ส่วนผลการยิงทดสอบกระสุน .44 กับเสื้อเกราะทั้ง 2 รูปแบบ ถูกแสดงในตารางที่ 4 และ 5 โดยรอยยุบตัวระหว่าง 16.5 – 21.3 มม. (รอยยุบดินน้ำมัน)

ตารางที่ 4 เหล็กกล้าไร้สนิมหนา 3 มม. เกราะแผ่น
หลังเป็นวัสดุอลูมิเนียมอัลลอยหนา 2 มม.

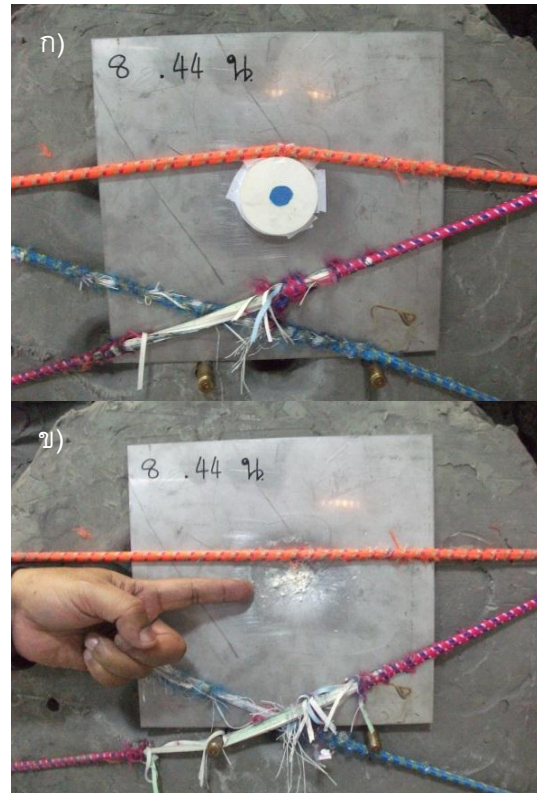
รอย กระสุน	ชนิด กระสุน	ความเร็ว		รอยยุบ ของดิน น้ำมัน (mm)
		กระสุน	ผล	
		(m/s)		
1	.44	450.94	ไม่ทะลุ	19.5
2	.44	447.09	ไม่ทะลุ	21.3

ตารางที่ 5 เกราะแผ่นหน้าเซรามิก 10 มม. เกราะแผ่น
หลังวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 2 มม.

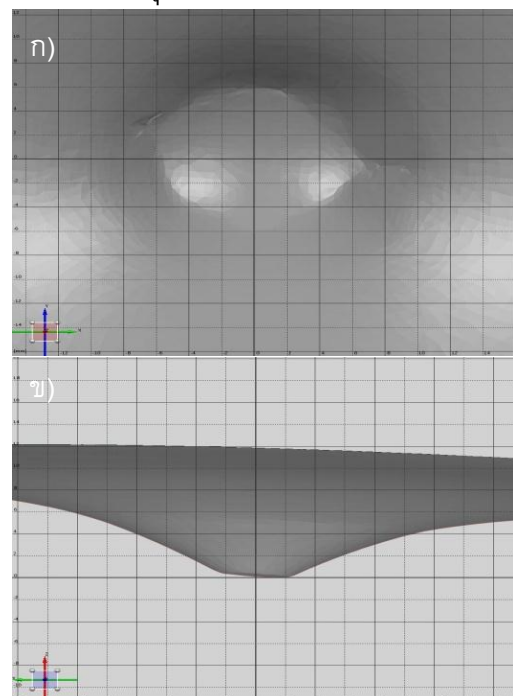
รอย กระสุน	ชนิด กระสุน	ความเร็ว		รอยยุบ ของดิน น้ำมัน (mm)
		กระสุน	ผล	
		(m/s)		
1	.44	449.20	ไม่ทะลุ	16.5

5.2 การวัดรอยยุบตัวด้วยเครื่อง 3D Optical scanner

ผลการวัดรอยยุบตัวจากเครื่อง 3D Optical scanner ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม (SS3) และอลูมิเนียมอัลลอย (AI2) ที่แสดงในรูปที่ 11 เปรียบเทียบกับผลการคำนวณในตารางที่ 2 ของเกราะเหล็กกล้าไร้สนิม (SS3) และอลูมิเนียมอัลลอย (AI2) ผลปรากฏว่าแผ่นเกราะที่ผ่านการยิงทดสอบมีขนาดรอยยุบตัว 7 มม. และน้อยกว่ารอยยุบตัวที่เกิดขึ้นบนกระเบดิน้ำมัน ทั้งนี้เนื่องจากปรากฏการณ์ดีดกลับคืนรูปของโลหะบริเวณที่ยังมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์อยู่ (Spring-back effect) ภายหลังจากที่กระสุนมีความเร็วเป็นศูนย์ ดังนั้นหากจะเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ควรเปรียบเทียบรอยยุบตัวบนดินน้ำมันที่บันทึกได้จากการยิงทดสอบจริงกับรอยยุบสูงสุดที่คำนวณได้ กล่าวคือ ควรเปรียบเทียบค่าที่ได้ในตารางที่ 2 กับตารางที่ 4 นั้นเอง



รูปที่ 10 เกราะเซรามิก/เหล็กกล้าไร้สนิม ก) การติดตั้งแผ่นเกราะกับแผ่นดินน้ำมันรองหลัง ข) ผลการยิงทดสอบและรอยยุบตัวของแผ่นรองหลัง



รูปที่ 11 การวัดขนาดของรอยยุบตัวของแผ่นเกราะด้วยเครื่อง 3D Optical scanner ก) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยยุบตัวด้านหน้า ข) ความลึกของรอยยุบตัวเมื่อพินิจจากด้านข้าง

6. สรุปผลการทดลอง

(Conclusions)

1. จากผลการยิงทดสอบตามมาตรฐานของกระสุนปืนพกขนาด .44 พบว่าเกราะทั้งสองแบบสามารถป้องกันกระสุนได้ดี ผลการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความถูกต้องสามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง หากพิจารณาระยะยุบตัวมากที่สุด

2. การจำลองเหตุการณ์ปะทะกันที่ความเร็วสูงของวัตถุด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเกราะประเภทอื่นได้อีก เช่น ชุดเกราะใน Level 3 หรือชุดเกราะป้องกันกระสุนปืนเล็กยาวที่เป็นอาวุธสงคราม

7. กิตติกรรมประกาศ

(Acknowledgements)

คณะนักวิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ทุนวิจัยประเภททุนนักวิจัยรุ่นใหม่แก่โครงการนี้ (สัญญาเลขที่ 53-07-05-179) และต้องขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ ระดับบัณฑิตศึกษา

8. เอกสารอ้างอิง

(References)

- [1] J. Lopez-Puente, A. Arias, R. Zaera, C. Navarro, The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours, An experimental and numerical study, Int. J. Impact Eng, Vol. 32, No 4, pp.321-336, 2005
- [2] พลโท อภิชาติ ทิมสุวรรณ, พันตรี ทรงพล เอี่ยมบุญฤทธิ์, ดร. ชัยณรงค์ ศรีกุลวงศ์, รศ. สมนึก วัฒนศรีกุล, โครงการวิจัยและพัฒนาเกราะป้องกันกระสุนปืนพกทุกขนาด และกระสุนปืนเล็กยาวที่เป็นอาวุธสงคราม, สนับสนุนโดย สกว., มีนาคม 2552
- [3] Ballistic resistance of body armor NIJ standard-0101.06, NIJ 2005 interim requirements, Ballistic resistance of body armor, Aug. 2005
- [4] R. Zaera, S. Sanchez-Saez, J.L. Perez-Castellanos, C. Navarro, Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact, Composites: Part A, 31, pp. 823–833, 2000
- [5] ฟิสิกส์ราชชมงคล. เรื่องราวของวัสดุ, แหล่งที่มา www.neutron.rmutphysics.com/news, เข้าดูเมื่อวันที่ 30/6/2553.
- [6] (MTEC). เรื่องราวของวัสดุ, แหล่งที่มา www.mtec.or.th เข้าดูเมื่อวันที่ 30/2/2553.
- [7] J. A. Zukas, T. Nicholas, L. B. Greszczuk, and D. R. Curran, Impact Dynamics, John Wiley & Sons
- [8] T. Borvik, M. Langseth, O. S. Hopperstad, K. A. Malo, Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses Part I: Experimental study, Int. J. Impact Eng, Vol. 27, pp. 19–35, 2002
- [9] T. Borvik, T. Berstad, O. S. Hopperstad, M. Langseth, Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses Part II: Numerical simulation study, Int. J. Impact Eng, Vol. 27, pp. 37–64, 2002
- [10] มาตรฐานแผ่นเกราะกันกระสุน. กมย.กท.2/2547, คณะอนุกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทธโปกรณ์กระทรวงกลาโหม
- [11] Theory Manual and SPH, ANSYS – Explicit 12.0.1
- [12] C.W. Ong, C.W. Boey, R.S. Hixson, J.O. Sinibaldi, Advanced layered personnel armor, Int. J. Impact Eng, Vol. 38, pp. 369-383, 2011