

การเคลื่อนที่ของเปลวเพลิงในภาชนะปิดแน่น
(Flame Propagation in Closed Vessels)

อัศวเดช สีนุกัก*

พงษ์เจต พนมวงศ์**

อรวรรณ สุทธชาติ**

โทชิโอะ อิจิมา***

บทคัดย่อ

วิธีการหาค่าเชิงประมาธสำหรับวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของเปลวเพลิงที่ไม่คงที่ในภาชนะปิดได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยหลักเกณฑ์ของโมเดลผิวหน้าเปลวเพลิงคงที่-ควอซี (quasi-steady) หนึ่งมิติ วิธีนี้ได้รวมกับข้อสมมติฐานเกี่ยวกับการไหลของก๊าซที่ถูกเผาไหม้ซึ่งมีส่วนประกอบคงที่เพื่อหาวิธีง่าย ๆ คำนวณหาการแปรเปลี่ยนของความดันต่อเวลา สนามการไหลที่ไม่คงที่ และสนามอุณหภูมิในรูปไว้มิติ ค่าตอบส่วนมากที่ได้จะอยู่ในรูปแบบการวิเคราะห์ และการคำนวณที่เกี่ยวข้องจะอยู่ในรูปที่ง่ายที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการที่แท้จริงอื่น ๆ ของการไหลของก๊าซที่ถูกเผาไหม้สมมูลย์ ในบทความนี้ได้นำพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของเปลวเพลิงทั้ง 3 ชนิดในภาชนะปิดมาเปรียบเทียบโดยอาศัยผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงประมาธ

-
- * ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 - ** อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 - *** ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น

1. บทนำ

ได้มีการเสนอวิธีการใหม่สำหรับวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของเปลวเพลิงที่ไม่คงที่ใน ภาวะปิด¹⁾ วิธีการนี้มีหลักเกณฑ์จากโมเดลเปลวเพลิงคงที่ควอซีนิ่งหนึ่งมิติง่าย ๆ แต่ที่แน่นอน ความคิดทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการวิเคราะห์ได้แยกออกจากแนวความคิดทางพลศาสตร์ของก๊าซ เพื่อให้ได้คำตอบที่แม่นยำโดยการคำนวณเชิงตัวเลขน้อยที่สุด เทอร์โมไดนามิกส์นั้นส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับ การคำนวณการเคลื่อนที่การสมดุลย์ทางเคมี สำหรับการเปลี่ยนแปลงสภาวะของก๊าซที่ถูกเผาไหม้ ขณะที่สนามการไหลในพลศาสตร์ของก๊าซได้จากการวิเคราะห์โดยการแก้สมการอนุรักษ์ของมวลทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ปัญหาหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับวิธีนี้คือ สิ้นเปลืองเวลามากในการคำนวณเชิงตัวเลข ดังนั้นจึงได้มีความพยายามหาวิธีใหม่มา เพื่อพัฒนาวิธีเชิงประมาดสำหรับหาการเคลื่อนที่ของเปลวเพลิงในภาวะปิด²⁾ ผลลัพธ์ส่วนใหญ่ของการวิเคราะห์ถูกหาอยู่ในรูปการวิเคราะห์ และสามารถนำมาทำนายพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของเปลวเพลิงในภาวะปิดได้โดยง่าย

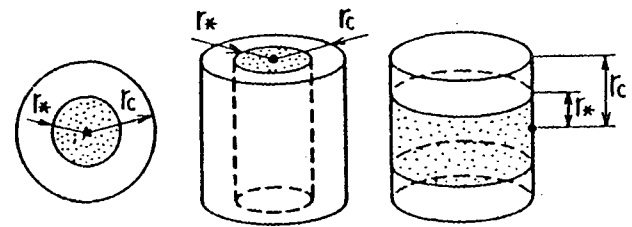
ในการทำโมเดลเครื่องยนต์สันดาปภายใน โมเดลรูปร่างเปลวเพลิงหลายชนิดได้ถูกนำมาใช้ ดังนั้น พฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของเปลวเพลิงในภาวะ 3 ชนิดโดยที่รูปร่างการเคลื่อนที่ของเปลวเพลิงมีรูปเป็น ทรงกลม ทรงกระบอก และระนาบได้ถูกนำมาเปรียบเทียบประยุคต์ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ต่อรูปร่างเหล่านี้

2. โมเดลและผลลัพธ์จากการวิเคราะห์

2.1 โมเดล (Model)

ภาวะปิดแข็งแวงอะเดีย

ปกติของรูปทรงเรขาคณิตมิติเดียว บรรจุด้วยของผสมกลมกลืนเป็นเนื้อเดียวกันที่สามารถเผาไหม้ได้ โดยที่



ทรงกลม ทรงกระบอก ทรงระนาบ

รูปที่ 1: รูปร่างการเคลื่อนที่ของเปลวเพลิงในภาวะปิด

ความเร็วการเผาไหม้ของมวล (mass burning velocity) เป็นฟังก์ชันของสถานะก๊าซที่ไม่เผาไหม้ที่เวลา $t=0$ ของผสมนี้ถูกจุดให้ลุกไหม้ที่ศูนย์กลาง และเปลวเพลิงอย่างสมมาตรได้เกิดขึ้นชั่ววูบ และเริ่มต้นเคลื่อนที่ออกไปจนถึงผนังที่เวลา $t=t_e$ ตามที่แสดงในรูปที่ 1 พฤติกรรมชั่ววูบของระบบระหว่างช่วงนี้ได้ถูกวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ที่ถูกต้องครั้งก่อนๆ ปฏิริยาทางเคมีในการไหลของก๊าซที่ไม่เผาไหม้ถือว่าคงที่ ขณะที่สมดุลย์ทางเคมีในการไหลของก๊าซที่ถูกเผาไหม้ถูกทำให้เกิดขึ้นเสมอ การคำนวณที่เกี่ยวข้องสำหรับสมดุลย์ของการไหลของก๊าซที่ลุกไหม้ยุ่งยากมาก ดังนั้นปฏิริยาเคมีใน

การไหลของก๊าซที่ถูกไหม้จะถูกสมมติว่าคงที่ เช่นเดียวกับในการไหลของก๊าซที่ไม่เผาไหม้ นอกจากนี้ เรายังตั้งสมมติฐานเพิ่มเติมว่า ค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat) ของก๊าซที่เผาไหม้และไม่เผาไหม้ทั้งสอง ยังคงที่ตลอดสถานะทั้งหมดของการเคลื่อนที่ของเปลวเพลิง ข้อสมมติฐานที่นำมาใช้ใหม่เหล่านี้มีหลักเกณฑ์โดยพิจารณาว่า การเคลื่อนที่ของเปลวเพลิงส่วนใหญ่ถูกควบคุมโดยสิ่งซึ่งเกิดขึ้นที่สถานะเริ่มต้น และขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ตามมาเล็กน้อย ในสถานะที่ก๊าซถูกเผาไหม้

2.2 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์

ตัวแปรไร้มิติต่างๆ มีดังนี้

$$\xi = \frac{r}{r_c}, \quad \tau = \frac{t}{\rho_0 r_c / m_0}, \quad v = \frac{v}{m_0 / \rho_0}, \quad \pi = \frac{p}{p_0}$$

$$\sigma = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad \theta = \frac{T}{T_0}, \quad \mu = \frac{m}{m_0}, \quad g = \frac{\int_{v_b} \rho_b dV}{\rho_0 V_c} \quad (1)$$

โดยที่ p, T, v, ρ, m และ g เป็นความดัน อุณหภูมิ อัตราความเร็ว ความหนาแน่น ความเร็วการเผาไหม้ของมวล (mass burning velocity) และสัดส่วนมวลที่ถูกเผาไหม้ (burned mass fraction) ตามลำดับ r, V, r_c และ V_c เป็นโคออร์ดิเนต รัศมี และปริมาตรภาชนะ a และ b แสดงสถานะเริ่มต้นของก๊าซและสถานะของก๊าซที่ถูกเผาไหม้ และ u แสดงสถานะของก๊าซที่ไม่ถูกเผาไหม้

1) การวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์

สถานะการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะของอนุภาคก๊าซใดๆ ที่เผาไหม้หรือไม่เผาไหม้สามารถหาได้โดยทางเทอร์โมไดนามิกส์เพียงลำพัง โดยเป็นอิสระกับพลศาสตร์ของก๊าซนี้ และเป็นสิ่งที่ง่ายมากในโมเดลอย่างง่ายของก๊าซที่องค์ประกอบไม่แปรเปลี่ยนซึ่งมีค่าความร้อนจำเพาะคงที่

ในการไหลของก๊าซที่ไม่เผาไหม้ที่ความดัน π

สมการอุณหภูมิจึงและความหนาแน่น

$$\theta_u(\pi) = \pi^{(\gamma_u - 1)/\gamma_u} \quad (2)$$

$$\sigma_u(\pi) = \pi^{1/\gamma_u} \quad (3)$$

ที่ซึ่ง γ เป็นค่าความร้อนจำเพาะ

สภาวะของก๊าซที่ไม่เผาไหม้ด้านหลังผิวหน้าของเปลวเพลิงที่ความดัน π_s

$$\theta_{b*}(\pi_s) = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{q}{\gamma_u} + \pi_s^{(\gamma_u-1)/\gamma_u} \right) \quad (4)$$

$$\sigma_{b*}(\pi_s) = \left(\frac{\gamma_b}{\gamma_u} \right) \left(\frac{\gamma_u-1}{\gamma_b-1} \right) \frac{\pi_s}{\left(\frac{q}{\gamma_u} + \pi_s^{(\gamma_u-1)/\gamma_u} \right)} \quad (5)$$

โดยที่การปล่อยความร้อนในรูปไร้มิติ (nondimensional heat release) และ
อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ กำหนดโดย

$$q = \frac{\left(\sum_{i=1}^N Y_{i0} h_i^0 - c_{pu} T^0 \right) - \left(\sum_{i=1}^N Y_{ib0} h_i^0 - c_{pb} T^0 \right)}{c_{pu} T^0}, \quad (6)$$

$$\epsilon = c_{pb} / c_{pu}. \quad (7)$$

ตามข้างบน N เป็นจำนวนทั้งหมดขององค์ประกอบที่แสดง Y_i , c_p , c_v
หมายถึง สัดส่วนมวล ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ ตามลำดับ
ส่วน T^0 และ T^0 เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของก๊าซที่ไม่เผาไหม้ และอุณหภูมิอ้างอิงที่ซึ่งเอนทัลปี
จำเพาะทางเคมี ขององค์ประกอบนั้น h_i^0 ได้ถูกหา ส่วน c_p เป็นค่าความร้อนจำเพาะ
ในภาวะไหลของก๊าซที่เผาไหม้ ที่ความดัน π โดย

อุณหภูมิและความหนาแน่นของก๊าซที่เผาไหม้ที่ความดัน π_s

$$\theta_b(\pi_s; \pi) = \theta_{b*} \left(\frac{\pi}{\pi_s} \right)^{(\gamma_b-1)/\gamma_b} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{q}{\gamma_u} + \pi_s^{(\gamma_u-1)/\gamma_u} \right) \left(\frac{\pi}{\pi_s} \right)^{(\gamma_b-1)/\gamma_b} \quad (8)$$

$$\sigma_b(\pi_s; \pi) = \sigma_{b*} \left(\frac{\pi}{\pi_s} \right)^{1/\gamma_b} = \left(\frac{\gamma_b}{\gamma_u} \right) \left(\frac{\gamma_u-1}{\gamma_b-1} \right) \frac{\pi_s^{(\gamma_b-1)/\gamma_b} \cdot \pi^{1/\gamma_b}}{\left(\frac{q}{\gamma_u} + \pi_s^{(\gamma_u-1)/\gamma_u} \right)} \quad (9)$$

สัดส่วนมวลที่เผาไหม้

$$g = \frac{\left(\frac{\gamma_u-1}{\gamma_b-1} \right) \pi - \left(\frac{\gamma_u-\gamma_b}{\gamma_b-1} \right) \pi^{(\gamma_u-1)/\gamma_u} - 1}{q - \left(\frac{\gamma_u-\gamma_b}{\gamma_b-1} \right) \pi^{(\gamma_u-1)/\gamma_u}} \quad (10)$$

ความดันสุดท้าย

$$\pi_s = \left(\frac{\gamma_b-1}{\gamma_u-1} \right) (q+1). \quad (11)$$

2) การวิเคราะห์พลศาสตร์ของก๊าซ (Gasdynamic analysis)

สมการของการอนุรักษ์มวลรวมเป็นรากฐานความสัมพันธ์ของความดัน สนามความเร็ว และสนามอุณหภูมิและความหนาแน่นต่อเวลา

สมการความดัน-เวลา

$$\frac{d\pi}{d\tau} = \frac{(k+1)\gamma_u\gamma_b\xi_*^k \mu\pi}{\gamma_b + (\gamma_u - \gamma_b)\xi_*^{k+1}} \left(\frac{1}{\sigma_{b*}} - \frac{1}{\sigma_u} \right) \quad (12)$$

โดยที่ k เป็นเลขจำนวนเต็ม ซึ่งหมายถึง รูปทรงเรขาคณิตของภาชนะนั้น และมีค่าเท่ากับ 0, 1 และ 2 สำหรับสมมาตรระนาบ ทรงกระบอก และทรงกลม ตามลำดับ สมการตำแหน่งเปลวเพลิงชั่วคราว

$$\xi_* = \left\{ \frac{q + \pi^{(\gamma_u - 1)/\gamma_u} - (q+1)\pi^{-1/\gamma_u}}{q - ((\gamma_u - \gamma_b)/(\gamma_b - 1))\pi^{(\gamma_u - 1)/\gamma_u}} \right\}^{1/(k+1)} \quad (13)$$

สมการปริมาตรจำเพาะผ่านผิวหน้าเปลวเพลิง

$$\frac{1}{\sigma_{b*}} - \frac{1}{\sigma_u} = \left(\frac{\gamma_u}{\gamma_b} \right) \left(\frac{\gamma_b - 1}{\gamma_u - 1} \right) \left(\frac{q}{\gamma_u \pi} + \pi^{-1/\gamma_u} \right) - \pi^{-1/\gamma_u} \quad (14)$$

สมการสนามความเร็ว

$$v_u(\xi, \tau) = \frac{1}{(k+1)\gamma_u} \left(\frac{1}{\xi^k} - \xi \right) \frac{1}{\pi} \frac{d\pi}{d\tau} \quad (15)$$

$$v_b(\xi, \tau) = - \frac{\xi}{(k+1)\gamma_b} \frac{1}{\pi} \frac{d\pi}{d\tau} \quad (16)$$

สมการเส้นทางเดินของอนุภาคก๊าซ

$$\xi_u(\xi_0; \tau) = \{ 1 - (1 - \xi_0^{k+1})\pi^{-1/\gamma_u} \}^{1/(k+1)} \quad (17)$$

$$\xi_b(\xi_0; \tau) = \{ 1 - (1 - \xi_0^{k+1})\pi^{-1/\gamma_u} \}^{1/(k+1)} \left(\frac{\pi_0}{\pi} \right)^{1/(k+1)\gamma_b} \quad (18)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาค และความดันที่ซึ่งอนุภาคถูกเผาไหม้

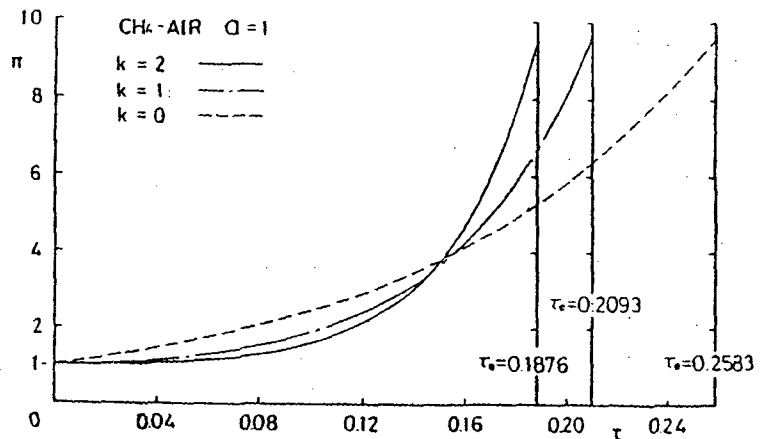
$$\xi_0^{k+1} = g(\pi_a) = \frac{\left(\frac{\gamma_u - 1}{\gamma_b - 1}\right) \pi_a - \left(\frac{\gamma_u - \gamma_b}{\gamma_b - 1}\right) \pi_a^{(\gamma_u - 1)/\gamma_u} - 1}{q - \left(\frac{\gamma_u - \gamma_b}{\gamma_b - 1}\right) \pi_a^{(\gamma_u - 1)/\gamma_u}} \quad (19)$$

3. การคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Calculation)

เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของเปลวเพลิง การคำนวณเชิงตัวเลขได้นำมาใช้สำหรับกรณีนี้เมื่อของผสม มีเทน-อากาศ ผสมกันพอดีทางเคมี (Stoichiometric methane-air mixture) ได้ถูกจุดให้ลุกไหม้ในภาชนะโดยที่เงื่อนไขเริ่มต้นเป็น $p_0 = 1 \text{ atm}$. และ $T_0 = 290.5 \text{ K}$ องค์ประกอบทางเคมีที่พิจารณา มี $\text{CO}_2, \text{H}_2, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{CO}, \text{H}_2\text{O}, \text{OH}, \text{NO}, \text{H}$ และ O ค่าต่างๆ ของก๊าซที่ลุกไหม้ตอนเริ่มต้น เช่น อุณหภูมิ ลัดส่วนมวลขององค์ประกอบหาได้โดยใช้การคำนวณความสมดุลสำหรับก๊าซที่ถูกเผาตอนเริ่มแรก ความเร็วการเผาไหม้ของมวลซึ่งขึ้นอยู่กับความดันนั้น ถูกสมมติว่าเป็น $\mu = \mu^a$ โดยที่ a เป็นค่าคงที่ และในที่นี้มีค่าเท่ากับ 1

รูปที่ 2 เปรียบเทียบ

เส้นโค้ง ความดัน-เวลา ที่หาได้นั้น ทั้ง 3 แบบของโมเดลการเคลื่อนที่ของเปลวเพลิง สำหรับโมเดลเปลวเพลิงทรงกลม ($k=2$) อัตราการเพิ่มขึ้นของความดันในช่วงต้นน้อยมาก แต่ทว่าในช่วงสุดท้าย อัตราการเพิ่มขึ้นของความดันกลับมากกว่ากรณีของโมเดลเปลวเพลิงทรงกระบอก

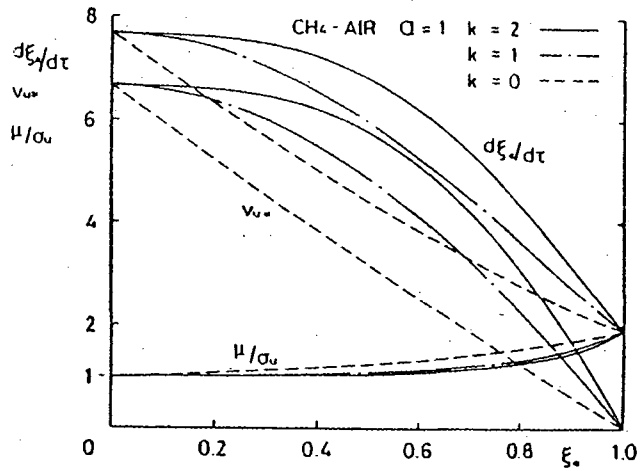


รูปที่ 2 เส้นโค้ง ความดัน และเวลา

($k=1$) และเปลวเพลิงระนาบ ($k=0$) ในเปลวเพลิงทรงกลมนั้นเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (τ_e) ของเปลวเพลิงจากจุดศูนย์กลางถึงผนังภาชนะจะสั้นที่สุด ระยะเวลาที่เปลวเพลิงมาถึงผนังของโมเดลเปลวเพลิงทรงกระบอก และเปลวเพลิงระนาบ เมื่อเทียบกับเปลวเพลิงทรงกลมจะนานมากกว่าประมาณ 12% และ 38% ตามลำดับ

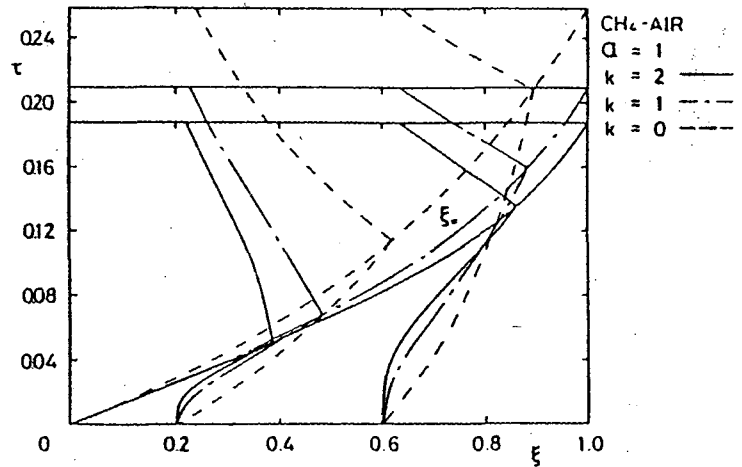
ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการเคลื่อนที่ของเปลวเพลิง ($d\xi_*/d\tau$) ความเร็วก๊าซที่ไหม้เผาไหม้และตั้งอยู่ตรงข้างหน้าของผิวเปลวเพลิงพอดี (ξ_{u*}) และความเร็วการ

เผาไหม้ (μ/σ_u) ค่อดำเนินการเปลว
เพลิงชั่วขณะ ξ_* ได้แสดงในรูปที่ 3 ความ
เร็วเหล่านี้สำหรับทรงกลมแล้วแปรเปลี่ยน
เพียงเล็กน้อยที่บริเวณตำแหน่งเปลวเพลิง
(ξ_*) มีค่าน้อยๆและจะเปลี่ยนอย่าง
รวดเร็วที่ช่วงหลังๆ เหมือนกับอัตราการ
เพิ่มขึ้นของความดันในรูปที่ 2 ส่วนเปลว
เพลิงระนาบ ($k=0$) ความเร็วของการ
เคลื่อนที่ของเปลวเพลิงจะแปรเปลี่ยน
เชิงเส้นกับตำแหน่งของเปลวเพลิง (ξ_*)



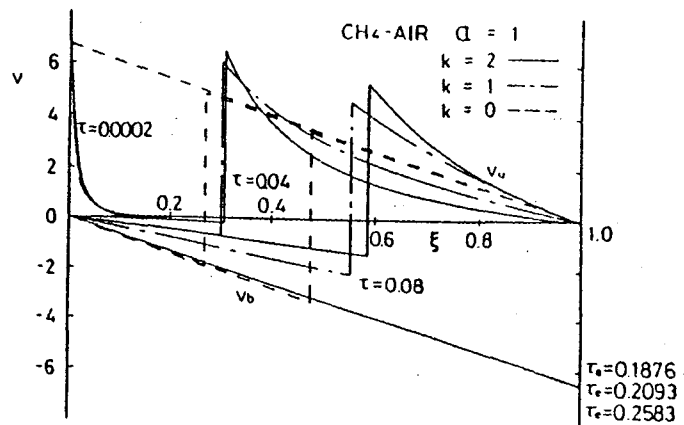
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของความเร็วของการเคลื่อนที่
ของเปลวเพลิง ความเร็วของก๊าซที่ไม่ถูกไหม้
ด้านหน้าผิวเปลวเพลิง และความเร็วของ
การลุกไหม้กับตำแหน่งของเปลวเพลิง

รูปที่ 4 แสดงแนวทางวิ่ง
ของเปลวเพลิง และแนวทางเดินของ
บางอนุภาค แนวทางวิ่งของเปลวเพลิง
ทั้ง 3 โมเดลในคอนดิชันแทบจะเหมือนกัน
และหลังจากนั้น แนวทางวิ่งของทั้ง 3
โมเดลจะเพิ่มขึ้นแตกต่างกันตามเวลาที่
เพิ่ม อนุภาคของก๊าซที่เผาไหม้และไม่
เผาไหม้สำหรับโมเดลเปลวเพลิงทรง
กลม จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ช้ากว่า
ทั้งสองโมเดลที่กล่าวมา



รูปที่ 4 แนวทางวิ่งของเปลวเพลิงและแนวทางเดินของ
อนุภาคต่างๆ

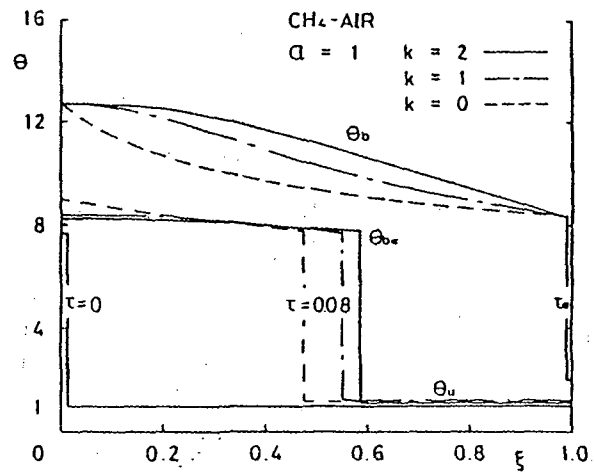
การกระจายของความเร็ว
ของก๊าซที่ถูกไหม้และไม่ถูกไหม้ตามระยะ
ทางชั่วขณะ ได้แสดงในรูปที่ 5 การ
แปรเปลี่ยนของความเร็วก๊าซที่ไม่เผา
ไหม้สำหรับแบบเปลวเพลิงทรงกลมจะ
เป็นเชิง exponential นับจากศูนย์
กลางของภาชนะสู่ผนัง ยกเว้นแบบเปลว
เพลิงระนาบเท่านั้นที่เป็นเชิงเส้นเหมือน
กับพฤติกรรมของก๊าซที่กำลังเผาไหม้



รูปที่ 5 การกระจายของความเร็วตามระยะทาง

ในก๊าซที่เผาไหม้ อุดหนุน

สูงสุดเกิดขึ้นที่ศูนย์กลางของภาชนะ และ จะลดลงเมื่อห่างออกไปจนถึงผนังตามที่ แสดงในรูปที่ 6 อัตราการลดลงของ อุณหภูมิสำหรับโมเดลเปลวเพลิงทรงกลม และ เปลวเพลิงทรงกระบอกจะน้อยมาก เมื่ออยู่ใกล้ศูนย์กลางของภาชนะ และ อัตรานี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อเคลื่อนห่างไปยังผนัง ส่วนพฤติกรรมของเปลวเพลิงจะนานจะ แตกต่างเป็นอย่างมากกับทั้งสองโมเดล ดังกล่าว



รูปที่ 6 การกระจายของอุณหภูมิตามระยะทางชั่วคราว

4. สรุป (Conclusion)

ระยะเวลาของการเคลื่อนที่ของเปลวเพลิงสู่ผนังภาชนะ สำหรับกรณีโมเดลเปลวเพลิงทรงกลมจะน้อยที่สุดและจะแตกต่างกับโมเดลเปลวเพลิงระนาบประมาณ 38% การกระจายของอุณหภูมิและความเร็ว และความเร็วมืดของการเคลื่อนที่ของเปลวเพลิงจะแตกต่างกันมากในและโมเดล คุณสมบัติต่างๆ ของการเคลื่อนที่ของเปลวเพลิงในภาชนะปิดจะแตกต่างกันเมื่อใช้โมเดลการเคลื่อนที่ของเปลวเพลิงแบบต่างกัน เราจำเป็นต้องพิจารณาความแตกต่างเหล่านี้เพื่อนำไปพัฒนาโมเดลการเคลื่อนที่ของเปลวเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายใน

บรรณานุกรม

- 1) T. Takeno and T. Iijima, Theoretical study of nonsteady flame propagation in closed vessels, Combustion and Reactive Systems. Progress in Astronautics and Aeronautics, vol. 76(1981), AIAA, New York, pp. 578-595.
- 2) T. Takeno and T. Iijima, A theoretical analysis of flame propagation in closed vessels, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, vol. 28, No. 79(1985), pp.1-15.