

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΦΛΟΓΕΣ ΠΡΟΜΙΞΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

4.1 Διάκριση φαινομένων καύσης

Τα περισσότερα φαινόμενα καύσης ανήκουν σε μια από τις ακόλουθες τρεις κατηγορίες (Strehlow (1968), Glassman (1977), Lewis and Von Elbe (1961), Jost (1946)):

- i) Φαινόμενα που ρυθμίζονται πρωταρχικά από τη χημική κινητική.
- (ii) Φαινόμενα που ρυθμίζονται πρωταρχικά από τη διάχυση μάζας, ορμής, και άλλες φυσικές διεργασίες ανάμιξης (μεταξύ καυσίμου/ οξειδωτή).
- (iii) Φαινόμενα στα οποία ο ρόλος της χημικής κινητικής και της φυσικής ανάμιξης είναι της ίδιας σημασίας.

Φαινόμενα της πρώτης κατηγορίας αντιμετωπίζουμε συνήθως (αλλά όχι απαραίτητα –δες κατηγορία (iii)) όταν το καύσιμο και ο οξειδωτής είναι προαναμιγμένα και εισάγονται στον χώρο όπου λαμβάνει χώρα η καύση στην προαναμιγμένη μορφή. Αυτές οι φλόγες συνήθως λέγονται φλόγες πρόμιξης (premixed).

Όταν καύσιμο και οξειδωτής έρχονται σε επαφή και αναμιγνύονται στο "χώρο" που λαμβάνει χώρα η καύση τότε αυτές οι φλόγες λέγονται και φλόγες διάχυσης (diffusion flames).

Φαινόμενα της πρώτης κατηγορίας είναι :

1. Έναυση (ignition) όπου αυξάνεται η θερμοκρασία των αντιδρωσών ουσιών (μέσω ηλεκτρικού σπινθήρα, μεταφοράς φλεγόμενων υλικών η συμπίεσης).
2. Σταθεροποίηση της φλόγας (stabilization) .
3. Μετάδοση της φλόγας (flame spread) και σε πολύ υψηλές ταχύτητες διάδοσης-κρουστική μετάδοση ή έκρηξη (detonation ή explosion).
4. Ψύξη – σβήσιμο φλόγας (quenching – blow-off).

Φαινόμενα που ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία είναι:

1. Καύση σταγονιδίων η στερεών σωματιδίων.
2. Στρωτές και τυρβώδεις φλόγες διάχυσης (όπου το καύσιμο και ο οξειδωτής έρχονται σε επαφή στη ζώνη καύσης)

Φαινόμενα καύσης που ανήκουν στην τρίτη κατηγορία:

1. Στρωτές και τυρβώδεις φλόγες προανάμιξης (καύσιμο και οξειδωτής είναι προανεμιγμένα).
2. Καύση στις Μ.Ε.Κ..

3. Καύση σε κινητήρες Ramjet.

4. Πυρκαγιές.

Η ανωτέρω κατάταξη των φαινομένων καύσης μπορεί να διευκρινιστεί μέσα από την κατωτέρω περιγραφή.

Ας υποθέσουμε ότι A, B και C είναι το καύσιμο, το οξειδωτικό και τα προϊόντα της καύσης σε αέρια μορφή και ας θεωρήσουμε ότι είναι ομοιόμορφα αναμεμιγμένα και καταναμημένα σε ένα θάλαμο καύσης. Εάν η θερμοκρασία του μίγματος είναι και αυτή ομοιόμορφα καταναμημένη ο ρυθμός της αντίδρασης στον αντιδραστήρα θα είναι ανεξάρτητος του χώρου.

Μια πλήρως αναμεμιγμένη ομοιογενής καύση λέγεται ότι είναι ελεγχόμενη από τη χημική κινητική. Τέτοια φαινόμενα καύσης είναι εκείνα όπου ο ρυθμός αντίδρασης (R - reaction rate) είναι αργός σε σχέση με το ρυθμό διάχυσης της ορμής, της θερμότητας και των συστατικών έτσι ώστε τα συστατικά και η θερμοκρασία να έχουν αρκετό χρόνο διαθέσιμο για εξομαλύνουν τις χωρικές ανομοιομορφίες.

Από την άλλη μεριά υπάρχουν φαινόμενα όπου ο ρυθμός αντίδρασης είναι γρήγορος. Όταν οι αντιδράσεις είναι πολύ γρήγορες οι χωρικές ανομοιομορφίες της σύνθεσης του μίγματος (species composition) και της θερμοκρασίας δεν έχουν το χρόνο να εξομαλυνθούν. Βαθμίδες μεταφοράς μάζας των συστατικών και της θερμοκρασίας αναπτύσσονται και προκαλούν διάχυση μάζας και θερμότητας προς περιοχές χαμηλότερης συγκέντρωσης και θερμοκρασίας. Τα αντιδρώντα διαχέονται (diffuse) προς και τα προϊόντα από τη ζώνη της φλόγας. Μια τέτοια μη καλώς αναμεμιγμένη καύση λέγεται πως είναι ελεγχόμενη από τη διάχυση (diffusion controlled). Φαινόμενα ελεγχόμενα από τη διάχυση είναι εκείνα τα φαινόμενα όπου ο ρυθμός αντίδρασης είναι πολύ πιο γρήγορος από ότι ο ρυθμός διάχυσης.

Εάν θεωρήσουμε την αντίδραση $1^{η} \text{ } \overset{k_1}{A} \rightarrow \text{προϊόν}$, ο ρυθμός

κατανάλωσης του A είναι $-\frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A$ ή $\ln \frac{C_{A0}}{C_A} = k t$ εάν ολοκληρώσουμε από $0 \rightarrow t$. Μπορούμε να θεωρήσουμε το χρόνο ημιζωής της αντίδρασης (ο απαιτούμενος χρόνος για ένα πακέτο αντιδρώντων να καταναλωθεί κατά τη μισή αρχική συγκέντρωση) $t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{k}$,

σαν δείκτη της ταχύτητας αυτής της απλής αντίδρασης.

Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό ενός αντιδρώντος ρευστοστατικού (non - flow) συστήματος η ταχύτητα διάχυσης, μπορεί να δοθεί (σε πρώτη προσέγγιση) συνάρτηση του

$\frac{l^2}{D_{AB}}$ όπου l είναι η χαρακτηριστική διάσταση του συστήματος και D_{AB} είναι ο συντελεστής

διάχυσης και το $\frac{l^2}{D_{AB}}$ έχει διαστάσεις χρόνου. Το $\frac{l^2}{D_{AB}}$ είναι λοιπόν ένας χαρακτηριστικός

χρόνος διάχυσης. Εάν το σύστημα ρέει ($u \neq 0$) μια χαρακτηριστική κλίμακα χρόνου θα ήταν $\frac{l}{u}$ το οποίο λέγεται και χρόνος παραμονής (residence time). Μια ποσοτική έκφραση των ανωτέρω λοιπόν θα ήταν ότι εάν ο χημικός χρόνος (χρόνος αντίδρασης) είναι πολύ μεγαλύτερος του φυσικού χρόνου (χρόνου διάχυσης) το φαινόμενο καύσης είναι κινητικά ελεγχόμενο. Στην αντίθετη περίπτωση είναι φυσικά (διαχυτικά) ελεγχόμενο.

Εν γένει οι κατάλληλες συνθήκες, ώστε μια περιοχή καύσης να ελέγχεται από τη χημική κινητική, δημιουργούνται όταν η ανάμιξη είναι πολύ υψηλή, οι συντελεστές διάχυσης είναι υψηλοί, το μέγεθος του χώρου που καταλαμβάνουν τα αντιδρώντα είναι μικρό, ο προεκθετικός παράγοντας συγκρούσεων AT^b (δες κεφάλαιο 2) είναι μικρός, η ενεργεία ενεργοποίησης είναι μεγάλη και η θερμοκρασία του αερίου χαμηλή. Αντίθετα όταν η ανάμιξη είναι μικρή, η ροή και η διάχυση είναι αργές, ο χώρος που καταλαμβάνει το αέριο μεγάλος και η χημική αντίδραση πολύ γοργή τότε εμφανίζονται φαινόμενα καύσης που ελέγχονται από τη διάχυση. Φλόγες διάχυσης μπορούν να μετατραπούν σε φλόγες κινητικές (πρόμιξης) είτε μέσω αύξησης του χημικού χρόνου είτε μέσω ελάττωσης του φυσικού χρόνου.

Σ' αυτό και το επόμενο κεφαλαίο θα επικεντρωθούμε στη μελέτη των φλογών προμιξης. Ανάλογα με την ύπαρξη ενός κύματος καύσης (combustion wave) και την ταχύτητα διάδοσης του κύματος καύσης μέσα από ένα αντιδρών μίγμα, οι αντιδράσεις των προαναμιγμένων αερίων γενικώς διαιρούνται σε τρεις κατηγορίες:

- 1) Έκρηξη (explosion): Εδώ ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας είναι τρομερά υψηλός αλλά δεν απαιτείται το πέρασμα ενός κύματος καύσης μέσω του αντιδρώντος μέσου για να έχουμε έκρηξη.
- 2) Υποηχητικό κύμα καύσης η απλή καύση (deflagration): ένα κύμα καύσης διαδιδόμενο με υποηχητική ταχύτητα.
- 3) Εκτυρσοκρότηση ή κρουστική καύση ή υπερηχητικό κύμα καύσης (detonation): Ένα κύμα καύσης διαδιδόμενο με υπερηχητική ταχύτητα.

Έκρηξη είναι όρος που συνδέεται με γοργότατη απελευθέρωση / γένεση θερμότητας (και/ή αύξηση της πίεσης λόγω περιορισμού του χώρου που λαμβάνει χώρα π.χ. μια αλυσιδωτή χημική αντίδραση). Ένα εκρηκτικό αέριο η μίγμα αερίων (καυσίμου και οξειδωτή) είναι εκείνο που επιτρέπει γοργή απελευθέρωση ενεργείας σε σύγκριση με τις περισσότερες σταθερές - χαμηλής θερμοκρασίας - αντιδράσεις. Μερικά μίγματα δεν διαδίδουν μια ζώνη καύσης ή "κύμα καύσης". Αυτά λέγονται ότι είναι έξω από τα όρια

ευφλεκτότητας (flammability limits) του εκρηκτικού μίγματος. Ο όρος έκρηξη είναι απόλυτα συνδεδεμένος με αυτοσυντηρούμενες χημικές αντιδράσεις των οποίων οι ρυθμοί αντίδρασης καθίστανται υπερβολικά υψηλοί. Είναι οι αλυσιδωτές αντιδράσεις που μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Το απλό κύμα καύσης είναι ένα υποηχητικό κύμα καύσης διαδιδόμενο και συντηρούμενο από την ενέργεια της χημικής αντίδρασης και τις διεργασίες της μετάδοσης θερμότητας και της διάχυσης συστατικών. Στη γενική πρακτική ένα κύμα καύσης λέγεται και φλόγα και μέτωπο της φλόγας (χρησιμοποιούνται όλοι οι οροί εναλλακτικά). Η εκπυρσοκρότηση είναι ένα κρουστικό κύμα το οποίο συντηρείται από την ενεργεία της χημικής αντίδρασης στο συμπιεσμένο εκρηκτικό μίγμα (explosive mixture). Κατά αντιδιαστολή μια έκρηξη (explosion) δεν απαιτεί κατ' ανάγκη το πέρασμα ενός κύματος καύσης δια μέσου του εκρηκτικού μίγματος. Ένα εκρηκτικό μίγμα μπορεί να συντηρήσει είτε καύση είτε εκπυρσοκρότηση ανάλογα με τις διάφορες συνθήκες, οι πιο εμφανείς βέβαια είναι ο περιορισμός του χώρου και ο λόγος μίγματος F/A.

Μια άλλη διαφορά μεταξύ καύσης και εκπυρσοκρότησης είναι ότι η εκπυρσοκρότηση συντηρεί τη χημική αντίδραση δια συμπίεσης (και όχι δια διάχυσης θερμότητας η συστατικών) και αυτοδιατηρείται. Επί πλέον ένα κρουστικό κύμα μπορεί να προκαλέσει εκπυρσοκρότηση αφ' εαυτού του ενώ άλλες πηγές έναυσης (ελεύθερες φλόγες, σπινθήρες) δεν την ξεκινούν.

Παραθέτουμε τώρα μερικά παραδείγματα διάφορων τύπων κυμάτων καύσης: Η φλόγα του κοπτικού η συγκολλητικού πυρσού. Κατά την ροή O_2 και H_2 ή ασετυλίνης στην κανονική ρύθμιση σχηματίζεται ένα jet εκρηκτικού αερίου μίγματος το οποίο διατηρεί ένα στάσιμο κύμα καύσης στο σχήμα ενός λαμπρότατου και φωτοβολουντος κώνου (Bunsen) του οποίου η βάση ακουμπά στο στόμιο του jet. Όταν διακοπεί η ροή του μίγματος ως του σημείου να οπισθοχώρηση η φλόγα μέσα στο σωλήνα, το κύμα καύσης εισέρχεται μέσα στον αγωγό και μετατρέπεται σε εκπυρσοκρότηση.

Εάν ένας σωλήνας που περιέχει εκρηκτικό μίγμα αναφλεχθεί στο ανοικτό άκρο του το κύμα καύσης αποκτά μια σταθερή ταχύτητα χωρίς να επιταχυνθεί σε εκπυρσοκρότηση. Εάν αναφλεχθεί στο κλειστό άκρο του σχηματίζεται πάλι ένα κύμα καύσης αλλά λόγω της αύξησης της πίεσης των καυσαερίων που δρουν σαν έμβολο επάνω στο κύμα καύσης το επιταχύνουν δημιουργώντας ένα κρουστικό κύμα και η αλληλοτροφοδοσία κύματος καύσης (λίγο πίσω) και κρουστικού κύματος (λίγο μπρος) συντηρούν την εκπυρσοκρότηση.

Ακολούθως σ' αυτό το κεφάλαιο θα συζητήσουμε τα χαρακτηριστικά των υποηχητικών και υπερηχητικών κυμάτων καύσης.

4.2 Ποιοτικές και ποσοτικές διαφορές μεταξύ υπερηχητικής (detonation) και υποηχητικής (deflagration) καύσης (Strehlow (1968), Lewis and Von Elbe (1961), Jost (1946), Kuo (1986)).

Θα περιοριστούμε σε μονοδιάστατη 1 – D, ανάλυση των κυμάτων καύσης και ένα τέτοιο σχηματικό διάγραμμα μονοδιάστατου κύματος καύσης δίδεται στο Σχήμα 4.1. Υποθέτουμε επίπεδο κύμα διαδιδόμενο σε ένα πολύ μακρύ αγωγό προς τα αριστερά με σταθερή ταχύτητα $u_1 = u_0$. Σε ένα σύστημα αναφοράς που κινείται με το κύμα, τα στάσιμα άκαυστα αέρια μπροστά από το κύμα, μπορούν να θεωρηθούν ότι κινούνται με ταχύτητα u_1 ως προς το κύμα, ενώ το κύμα μπορεί να θεωρηθεί ακίνητο. Ο δείκτης (1, u) αναφέρεται στις συνθήκες των ακαύστων αερίων μπροστά από το κύμα και ο δείκτης (2, b) στις συνθήκες των καυσαερίων πίσω από το κύμα.

Τοπικά δεδομένα για τις ανάντι και κατάντι του κύματος συνθήκες δίδονται στον Πίνακα 4.1 (Kuo, 1986) και παρουσιάζουν μια καλή εικόνα των φυσικών καταστάσεων που επικρατούν στην εκपुरσοκρότηση και στην απλή υποηχητική καύση.

4.3 Η καμπύλη Hugoniot

Οι εξισώσεις διατήρησης για μόνιμη, μονοδιάστατη ροή, χωρίς πεδιακές δυνάμεις και εξωτερική προσαγωγή ή απαγωγή θερμότητας, με αμελητέες επιδράσεις Dufour και ενδοδιαχυσης είναι:

Συνέχειας

$$\frac{d(\rho u)}{dx} = 0 \quad (4-1)$$

Ορμής

$$\rho u \frac{du}{dx} = -\frac{dP}{dx} + \frac{d}{dx} \left[u \left(\frac{4}{3} \mu + \mu' \right) \frac{du}{dx} \right] \quad (4-2)$$

Ενέργειας

$$\rho u \left[\frac{d}{dx} \left(h + \frac{u^2}{2} \right) \right] = -\frac{d}{dx} q_{cond} + \frac{d}{dx} \left[u \left(\frac{4}{3} \mu + \mu' \right) \frac{du}{dx} \right] \quad (4-3)$$

όπου

$$q_{cond} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (4-4)$$

και

$$h = c_p T + h^\circ$$

(4-5)

Μέσω ολοκλήρωσης των εξ. (4-1) έως (4-3) λαμβάνουμε τις ακόλουθες εξισώσεις διατήρησης που μας παρέχουν τις σχέσεις μεταξύ των ροϊκών ιδιοτήτων στις δυο περιοχές του άκαυστου και του καμμένου μίγματος.

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 = \dot{m}$$

$$P_1 + \rho_1 u_1^2 = P_2 + \rho_2 u_2^2$$

$$c_p T_1 + \frac{1}{2} u_1^2 + q = c_p T_2 + \frac{1}{2} u_2^2$$

ή

$$h_1 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 = h_2 + \frac{1}{2} \rho u_2^2$$

(4.5)

και

$$P_2 = \rho_2 R_2 T_2$$

όπου

$$q = h^\circ_{f,1} - h^\circ_{f,2}$$

και

$$h^\circ = \sum_i^N Y_i \Delta h^\circ_{f,i}$$

Όπου

$$h_i = \Delta h_f^0 + h_{\text{sensible}}$$

Υπάρχουν τέσσερις εξισώσεις αλλά πέντε άγνωστοι u_1 , u_2 , ρ_2 , T_2 , P_2 .

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (4.5) έχουμε:

$$\rho_1^2 u_1^2 = \frac{P_2 - P_1}{\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}} = \dot{m}^2 \quad (4.6)$$

Η εξ. (4.6) είναι γνωστή σαν σχέση Rayleigh και επιλύεται είτε για το $u_{1,u}$ είτε για το $u_{2,b}$. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση της ενέργειας και την εξίσωση (4.6) λαμβάνουμε την εξίσωση (4.7) που είναι γνωστή σαν τη εξίσωση Hugoniot.

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{2} (P_2 - P_1) \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \quad (4.7)$$

Το διάγραμμα του P_2 συναρτήσει του $(1/\rho_2)$ για δεδομένη απελευθέρωση ενέργειας ανά μονάδα μάζας καλείται καμπύλη Hugoniot και δείχνεται στο Σχήμα 4.2. Η σχέση Hugoniot μπορεί επίσης να εκφραστεί συνάρτηση της ολικής (θερμικής και χημικής) ενθαλπίας h . Διαχωρίζοντας την χημική από την αισθητή ενθαλπία η εξίσωση Hugoniot γράφεται

$$c_v(T_2 - T_1) = \frac{P_2 + P_1}{2} \left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1} \right) + \Delta H_{f,i}^0 \quad (4.8)$$

Όπου το c_v είναι η ειδική θερμότητα.

4.4 Ιδιότητες της καμπύλης Hugoniot

Η καμπύλη του σχήματος 4.2 είναι ουσιαστικά ένα διάγραμμα όλων των δυνατών τιμών των $(1/\rho_2, P_2)$ για δεδομένες τιμές των $(1/\rho_1, P_1)$ και q . Το σημείο $(1/\rho_1, P_1)$ το οποίο συνήθως καλείται αρχή του διαγράμματος Hugoniot δείχνεται με το σημείο A. Χαράσσοντας από το σημείο A εφαπτόμενες προς την καμπύλη και κάθετες και οριζόντιες προς τους άξονες διαιρούμε την καμπύλη σε τέσσερις περιοχές I, II, III, IV και V. Τα δυο σημεία των εφαπτόμενων καλούνται Chapman – Jouguet σημεία και αναφέρονται σαν C – J σημεία με U για το άνω και L για το κάτω C-J σημείο. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι αν και η καμπύλη Rankine–Hugoniot (R-H) αναπαριστά όλες τις πιθανές λύσεις της εξίσωσης R-H μόνο ορισμένα τμήματα της παριστάνουν φυσικώς δυνατές λύσεις. Αυτό συζητείται κατωτέρω.

Στην περιοχή V, έχουμε $P_2 > P_1$ και $1/\rho_2 > 1/\rho_1$. Η έκφραση Rayleigh (4.6) τότε υπονοεί ότι το $Mach_1$ είναι ένας μιγαδικός φανταστικός αριθμός. Άρα η περιοχή V είναι φυσικώς αδύνατη περιοχή. Επίσης θεωρώντας το q μηδενικό μπορεί ναδειχθεί ότι στα σημεία C – J έχουμε $|u_2| = C_2$ (ταχύτητα του ήχου) και συνεπώς στα σημεία U και L έχουμε

$M_2=1$. Στις περιοχές εκπυρσοκρότησης I και II έχουμε $\frac{1}{P_2} < \frac{1}{P_1}$ και συνεπώς από την εξ

(4.6) μπορεί να συναχθεί (ιδέ και Kuo, 1986) ότι στην περιοχή αυτή έχουμε εκπυρσοκρότηση και το C-J κύμα εκπυρσοκρότησης στην περιοχή αυτή ταξιδεύει με υπερηχητική ταχύτητα αλλά τα καυσαέρια ουδέποτε προλαμβάνουν το κύμα.

Επιπροσθέτως είναι δυνατό ναδειχθεί μέσω θεωρήσεων εντροπίας και του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής ότι η περιοχή της καμπύλης R-H, IV (που καλείται περιοχή ισχυρών υποηχητικών κυμάτων καύσης) και το σημείο C-J, L είναι φυσικώς μη πραγματοποιήσιμες λύσεις. Παρόμοια μέσω θεωρήσεων των φαινομένων μεταφοράς μπορεί ναδειχθεί ότι και οι περιοχές I (ισχυρές εκπυρσοκροτήσεις) και II (ασθενείς

εκφυροκροτήσεις) είναι μη πραγματοποιήσιμες. Έτσι οι μόνες περιοχές της καμπύλης R - H που παριστούν φυσικώς πραγματοποιήσιμες λύσεις είναι το σημείο C-J και η περιοχή III.

Πίνακας 4.1 Τυπικά δεδομένα για εκτυρσοκρότηση και καύση (Κυο, 1986)

	Detonation	Deflagration
u_1/c_1	5–10	0.0001–0.03
u_2/u_1	0.4–0.7 (deceleration)	4–6 (acceleration)
p_2/p_1	13–55 (compression)	≈ 0.98 (slight expansion)
T_2/T_1	8–21 (heat addition)	4–16 (heat addition)
ρ_2/ρ_1	1.7–2.6	0.06–0.25

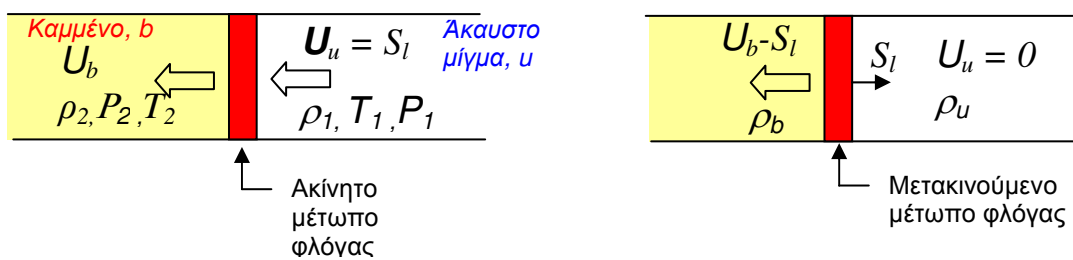
Πίνακας 4.2 Ταχύτητες εκτυρσοκρότησης για διάφορα μίγματα στους 298 Κ και 1 atm (Κυο, 1986)

Mixture	u_0 meter/sec
$2H_2 + O_2$	2,821
$2CO + O_2$	1,264
$CH_4 + 2O_2$	2,146
$CH_4 + 1.5O_2 + 2.5N_2$	1,880
$C_2H_6 + 3.5O_2$	2,363
$C_2H_6 + 3O_2$	2,209
$C_2H_4 + 2O_2 + 8N_2$	1,734
$C_2H_2 + 1.5O_2$	2,716
$C_2H_2 + 1.5O_2 + N_2$	2,414
$C_3H_8 + 3O_2$	2,600
$C_3H_8 + 6O_2$	2,280
$i-C_4H_{10} + 4O_2$	2,613
$i-C_4H_{10} + 8O_2$	2,270
$C_5H_{12} + 8O_2$	2,371
$C_5H_{12} + 8O_2 + 24N_2$	1,680
$C_6H_6 + 7.5O_2$	2,206
$C_6H_6 + 22.5O_2$	1,658
$C_2H_5OH + 3O_2$	2,356
$C_2H_5OH + 3O_2 + 12N_2$	1,690

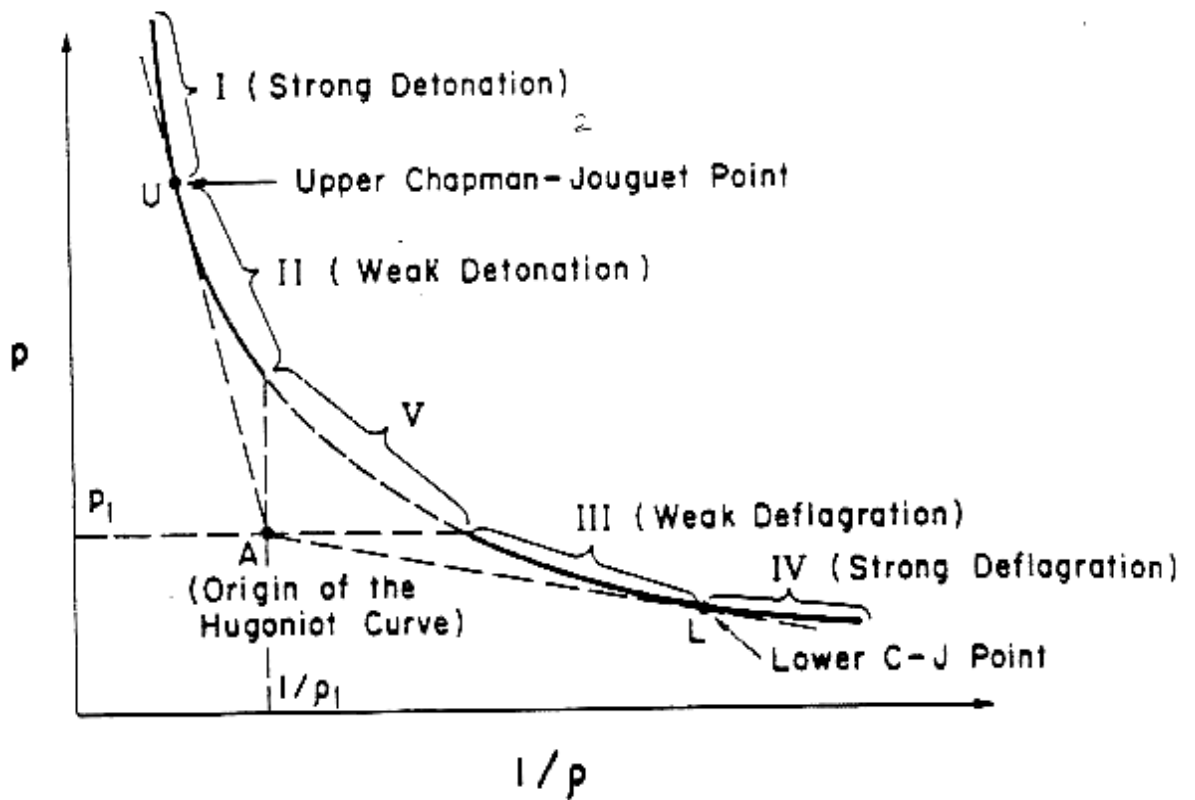
* From Laffitte as quoted by Jost, in *Explosion and Combustion Processes in Gases*, McGraw-Hill (1946).

Πίνακας 4.3 Σύγκριση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών ταχυτήτων εκτυρσοκρότησης (Κυο, 1986)

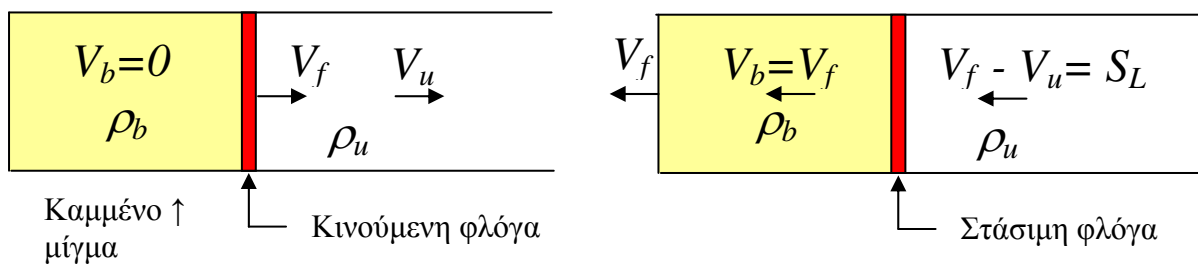
Explosive Mixture	p_2 (atm)	T_2 (K)	u_1 (calc.) (m/sec)	u_1 (expt.) (m/sec)	Dissociation (mole %)
$(2\text{H}_2 + \text{O}_2)$	18.0	3583	2806	2819	32
$(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + \text{O}_2$	17.4	3390	2302	2314	30
$(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + \text{N}_2$	17.4	3367	2378	2407	18
$(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + 5\text{N}_2$	14.4	2685	1850	1822	2
$(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + 6\text{H}_2$	14.2	2650	3749	3532	1



Σχήμα 4.1 Σχηματικό διάγραμμα και συμβολισμοί ενός μονοδιάστατου κύματος καύσης



Σχήμα 4.2 Η καμπύλη Hugoniot στο $(P, 1/\rho)$ επίπεδο



Σχήμα 4.3 Σχηματικό διάγραμμα και συμβολισμοί ενός μονοδιάστατου κύματος καύσης