

Satoshi OKAJIMA*

Pomiary szybkości spalania mieszanki eteru dimetylowego z powietrzem przy użyciu techniki mikrociężenia

Przeprowadzono doświadczenie, którego celem było sprawdzenie charakterystyki spalania mieszanki powietrza i eteru dimetylowego przy wykorzystaniu techniki mikrociężenia, wymagające komory swobodnego opadania. Warunki początkowe badań były następujące: temperatura 293 K, ciśnienie 0,10 MPa a stosunek składników mieszaniny zmieniał się od stechiometrycznego do granic zapalności mieszanki. Uzyskano następujące wyniki: (1) technika mikrociężenia jest bardzo użyteczna w analizie zachowania płomienia, nawet dla bardzo ubogich mieszanek, oraz (2) szybkość spalania mieszanki eteru dimetylowego jest podobna do prędkości spalania metanu w całym zakresie analizowanych składowych mieszanki i wynosi 10,0 cm/s oraz 32,0 cm/s, odpowiednio dla mieszanki o stosunku 0,62 i 0,90 a także (3) na podstawie wyników badań można wnioskować, że użycie mieszanki z eterem dimetylowym jest wykluczone w przypadku silników. Słowa kluczowe: eter dimetylowy DME, spalanie wstępnie przygotowanej mieszanki, rozchodzenie płomienia, szybkość spalania, mikrociężenie

Measurement of burning velocity on DME fuel-air mixtures using microgravity technique

Experiment has been carried out to examine the fundamental combustion characteristics of DME fuel-air mixtures using micro-gravity technique, which is achieved in freely falling chamber. The initial conditions of temperature and pressure are 293 K and 0.10 MPa, respectively and the equivalence ratio is the range from stoichiometric proportion to near the lower flammability limit. The results obtained in the study are as follows: (1) micro-gravity technique is very useful to analyze the flame behavior even at very lean mixtures, and (2) the burning velocity of DME fuel-air mixture is nearly the same with that of methane-air mixture at the range of all the equivalence ratios investigated and those values of DME fuel are 10.0 cm/s and 32.0 cm/s at 0.62 and 0.90 of equivalence ratio, respectively, and (3) from these experimental data it is suggested that the application to the engine combustion of DME fuel is not so impossible.

Key words: DME, premixed combustion, flame propagation, burning velocity, micro-gravity

1. Wprowadzenie

Obecnie ze względu na konieczność oszczędzania energii i zapobiegania zanieczyszczeniu środowiska oczekuje się rozwoju nowych rodzajów paliw jak eter dimetylowy DME (Di-Methyl Ether, $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$) czy paliw uzyskiwanych z przeróbki odpadków i biomasy. Właśnie o eterze mówi się jako o paliwie korzystnym z punktu widzenia ograniczenia emisji, tak z silników jak i z kotłów, a ponadto zachowanie mieszaniny eteru z powietrzem bardzo przypomina zachowanie mieszaniny powietrza z metanem i propanem pomimo jej małej wartości opałowej. Trudno jednak uzyskać podstawowe dane na temat spalania tej mieszanki, mimo że jego zastosowanie w różnych urządzeniach cieplnych jest istotne.

Pierwszym krokiem w badaniach było przeprowadzenie doświadczeń w celu uzyskania podstawowych danych jak szybkość spalania, granice zapalności oraz odległość wygaszenia płomienia zarówno w warunkach ciężenia normalnego jak i mikrociężenia. W szczególności, warunki mikrociężenia umożliwiają uzyskanie kulistego rozchodzenia się płomienia nawet w pobliżu granic zapalności przez wyeliminowanie zjawiska wyporu hydrostatycznego wywołanego ciężarem i dzięki temu określenie dokładnej wartości prędkości spalania dla danego ośrodka.

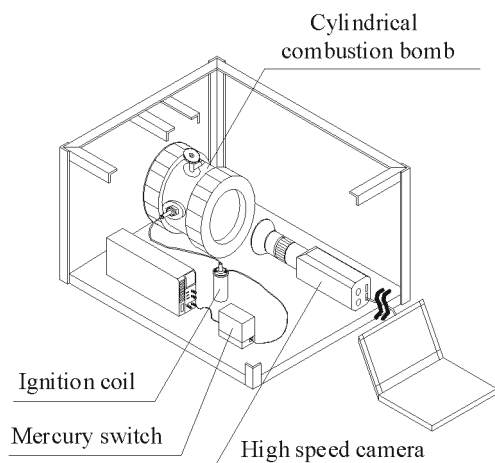
1. Introduction

At the present day, the development of new types of fuels such as DME (Di-Methyl Ether, $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$) and waste and bio-mass fuels is strongly required from the viewpoint of energy saving and air pollution prevention on exhaust combustion gases generated from many kinds of combustors. Especially, it is said that DME as a fuel is very useful for reducing the pollutant substances from diesel engines and boilers and moreover it is recognized that the combustion behavior of DME fuel-air mixture is very much similar to those of methane-air and propane-air mixtures in spite of low heat values of combustion. However, there are scarcely basic data on the combustion of DME fuel-air mixtures, though the application of DME fuel to many kinds of combustors is considered to be very important.

As the first step of the study, experiment has been carried out to elucidate the essential data on combustion of DME fuel-air mixtures such as burning velocity, flammability limits and quenching distance in both conditions of normal and micro-gravity. Particularly, micro-gravity environment makes it possible to realize the spherical flame propagation even for near the flammability limits by eliminating buoyant effect induced from gravity and one can obtain the burning velocity with very high accuracy in this environment.

2. Aparatura i przebieg badań

Na rysunku 1 pokazano schemat urządzenia pomiarowego użytego do badań. Jest to prostopadłościan o wymiarach $510 \times 670 \times 360$ mm i masie ok. 35 kg. Urządzenie to zawiera walcową bombę kalorymetryczną o średnicy wewnętrznej 120 mm i długości 120 mm, kamerę do szybkich zdjęć do obserwacji przebiegu spalania, urządzenie zapłonowe (systemu CDI) oraz układ optyczny składający się z lustra i przekaźników obrazu. Elektrody zapłonowe w postaci igieł (o średnicy 1,0 mm i odstępach 3 mm) umieszczone dokładnie w środku bomby.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

Fig. 1. Outline of test assembly

Warunki mikrociężenia uzyskano za pomocą wieży o wysokości 3 m do spuszczenia urządzenia do obserwacji a czas pomiaru wynosił ok. 0,6 s. Poziom przyspieszenia ziemskiego podczas swobodnego spadku w wyniku oporu powietrza wynosi mniej więcej $10^{-5}g$ [1, 2].

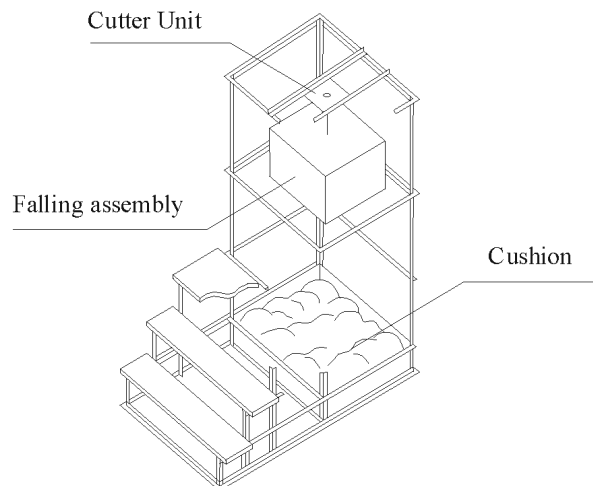
Eksperyment przeprowadzono przy ciśnieniu początkowym (p) 0,10 MPa i w temperaturze początkowej (T_u) 293 K. Badane proporcje mieszanki zawierały się w zakresie od stechiometrycznych do niemal dolnej granicy zapalności. Prężność badanej mieszanki była na bieżąco kontrolowana i utrzymywana dzięki zastosowaniu prawa częściowych ciśnień par paliwa i powietrza.

3. Wyniki doświadczenia i komentarz

Na rysunku 3 pokazano pojedyncze fotografie spalającej się mieszanki powietrza i eteru dimetylowego dla różnych stosunków składników (ϕ), dla normalnej siły ciężkości. Na zdjęciach tych można zauważyć, że w pobliżu dolnej granicy zapalności na płomień wyraźnie oddziałuje siła wyporu, co sprawia, że w trakcie procesu spalania płomień przyjmuje kształt meduzy, choć dla wartości ok. 85% stosunku równowagi kształt ten zmienia się w kulisty. Przeciwnie, kształt płomienia uzyskany pod działaniem minimalnej siły ciężkości jest doskonale kulisty nawet dla bardzo małych wartości stosunku składników, jak to pokazano na rysunku 4. Oznacza to, że pod działaniem minimalnej siły

2. Experimental apparatus and procedure

The outline of test assembly employed in the study is shown in Fig. 1 and it is a rectangular shape of $510 \times 670 \times 360$ mm and weight is about 35 kg. The test assembly contains a cylindrical combustion bomb of 120 mm in length and 120 mm in inner diameter, a high speed digital camera for observation of combustion behavior, an ignition equipment (CDI system) and an optical system including mirror and relay devices. Needle electrodes for ignition (1.0 mm diameter and 3 mm gap width) are accurately centered in the combustion bomb.



Rys. 2. Wieża

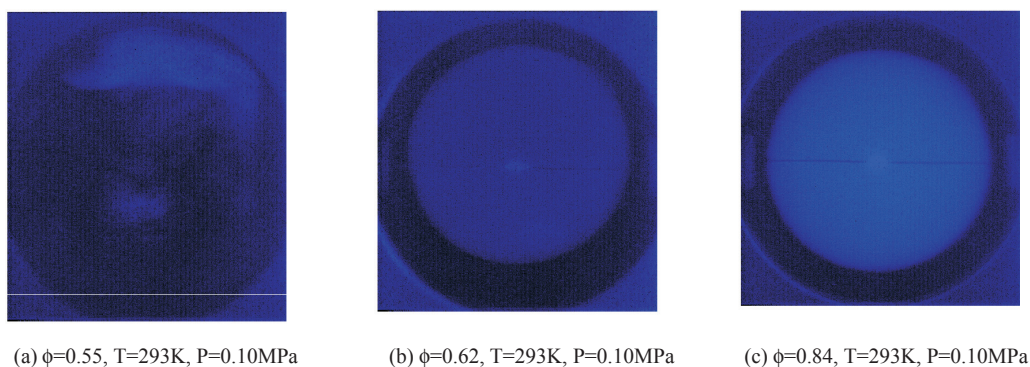
Fig. 2. Falling tower

The micro-gravity environment is achieved by drop tower facilities of 3 m height (Fig. 2) and its observation time is approximately 0.6 second. The gravity level inside the test assembly with air drag shield during free fall is approximately $10^{-5}g$ [1, 2].

Experiment has been carried out at 0.10MPa and 293K of initial pressure (p) and temperature (T_u), respectively. The equivalence ratio studied is the range from stoichiometric proportion to near the lower flammability limit. The mixture strength investigated is controlled and produced by the law of partial pressure of fuel gas and air.

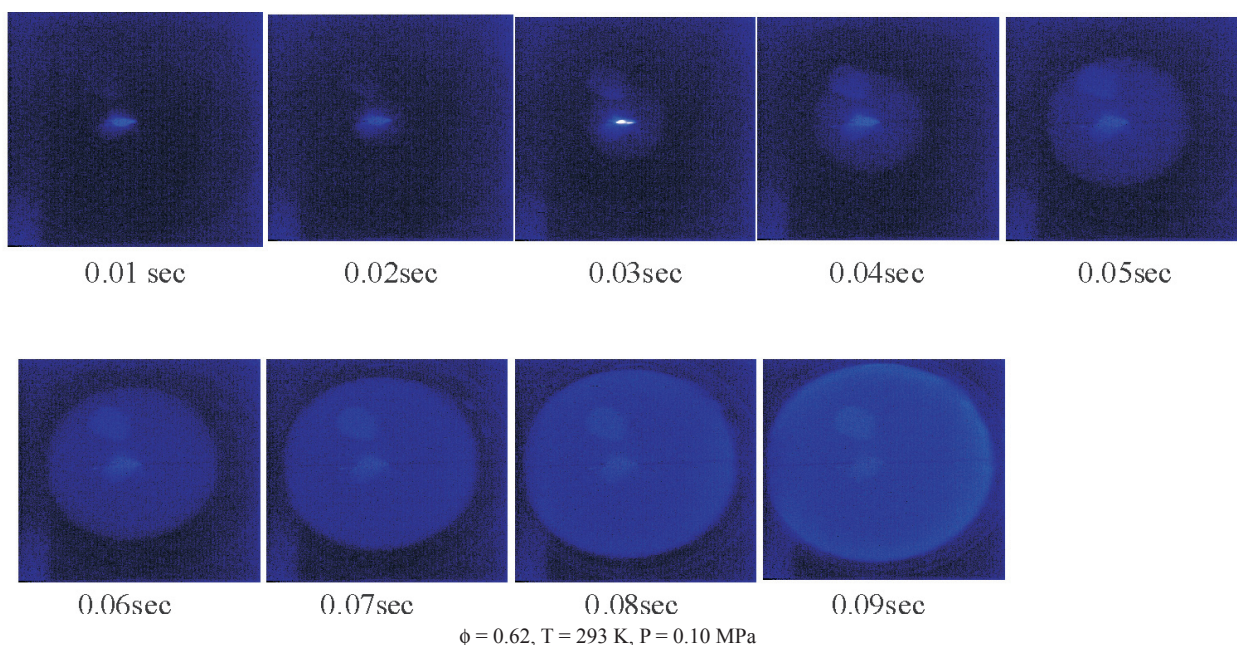
3. Experimental results and discussion

Figure 3 shows the one shot photographs on DME fuel-air mixtures burning at various equivalence ratios (ϕ) under normal gravity. From these photographs it is recognized that in the vicinity of lower flammability limit the flame is markedly affected by buoyant force induced from gravity so that the flame shape looks like a jellyfish, though for about 0.85 of equivalence ratio its configuration depicts almost spherical during the combustion process. On the contrary, the flame shape obtained under micro-gravity even for very low equivalence ratio as shown in Fig.4 is perfectly spherical during the burning process. This means that under micro-gravity the most essential combustion characteristics such as flame speed and burning velocity can be determined with very high accuracy.

(a) $\phi=0.55$, $T=293\text{K}$, $P=0.10\text{MPa}$ (b) $\phi=0.62$, $T=293\text{K}$, $P=0.10\text{MPa}$ (c) $\phi=0.84$, $T=293\text{K}$, $P=0.10\text{MPa}$

Rys. 3. Pojedyncze zdjęcia spalania mieszanki DME pod działaniem normalnej siły ciężkości

Fig. 3. One shot photographs on DME fuel combustion under normal gravity



0.01 sec

0.02sec

0.03sec

0.04sec

0.05sec

0.06sec

0.07sec

0.08sec

0.09sec

 $\phi = 0.62$, $T = 293 \text{ K}$, $P = 0.10 \text{ MPa}$

Rys. 4. Kolejne zdjęcia spalania mieszanki DME pod działaniem zmniejszonej siły ciężkości

Fig. 4. Sequential photographs on DME fuel combustion under micro-gravity

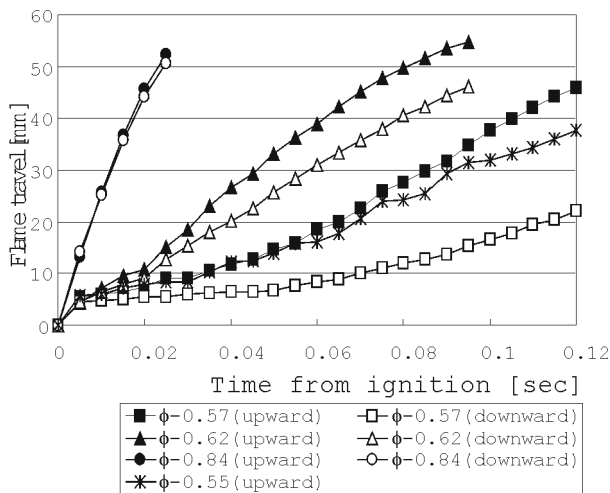
ciężkości najbardziej charakterystyczne cechy spalania jak prędkość spalania i rozchodzenia się płomienia mogą zostać określone z bardzo dużą dokładnością.

Na rysunkach 5 i 6 pokazano przebieg rozchodzenia się płomienia w czasie dla mieszanek powietrza z eterem dimetylowym, odpowiednio pod działaniem normalnej i zmniejszonej siły ciężkości. Jak wspomniano wyżej, na charakter rozchodzenia się płomienia pod działaniem normalnej siły ciężkości istotnie wpływa siła wyporu hydrostatycznego a także można zaobserwować jego nieregularne rozchodzenie się, szczególnie w przypadku mieszanek bardzo ubogich. Przeciwnie, w przypadku działania zminimalizowanej siły ciężkości odległości, jakie pokonuje płomień w górę i w dół są dokładnie takie same dla dowolnego momentu spalania. Oznacza to, że doskonale kuliste rozchodzenie się płomienia może zostać osiągnięte właśnie w warunkach minimalnej siły ciężkości.

Na rysunku 7 pokazano szybkość rozchodzenia się płomienia S_f w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza ϕ

In Figs. 5 and 6 are shown the behavior of flame travel against time from ignition for DME fuel-air mixtures burning under conditions of normal and micro-gravity, respectively. As above-mentioned, the behavior of flame travel under normal gravity is considerably influenced by buoyant force and, especially at very lean mixture the irregular flame propagation may be observed. On the contrary, under micro-gravity the upward and downward flame travel distances are absolutely the same at any combustion time. This means that the perfectly spherical flame propagation can be realized in micro-gravity environment.

Figure 7 shows the flame propagation speed S_f against equivalence ratio for DME and propane burning under normal gravity. The measurement of flame speed is taken place at the flame diameter of 30 mm, where the pressure rise in combustion bomb is almost negligible and the flame propagation speed is nearly constant as shown in Fig. 5. From this figure it is found that under normal gravity the discrepancy between the upward and downward flame propagation speeds



Rys. 5. Charakter rozchodzenia się płomienia mieszank DME i powietrza w warunkach minimalnej grawitacji (zasięg płomienia z funkcji czasu od zapłonu)

Fig. 5. Flame travel behavior of DME fuel-air mixtures

dla mieszank DME i powietrza w warunkach normalnej grawitacji. Pomiaru prędkości płomienia dokonano dla średnicy płomienia 30 mm, gdy wzrost ciśnienia w bombie jest prawie pomijalny, a prędkość rozchodzenia się płomienia jest niemal stała, jak to pokazano na rysunku 5. Z rysunku tego wynika, że w warunkach normalnej grawitacji różnica pomiędzy prędkością rozchodzenia się płomienia w górę i w dół wzrasta wraz ze zmniejszaniem się wartości współczynnika nadmiaru powietrza, co wynika z wpływu naturalnej konwekcji, choć obie te prędkości zmniejszają się wraz ze zmniejszaniem j . Taki przebieg spalania nie różni się od spalania mieszank metanu i propanu dla wszystkich analizowanych wartości współczynnika nadmiaru powietrza [3].

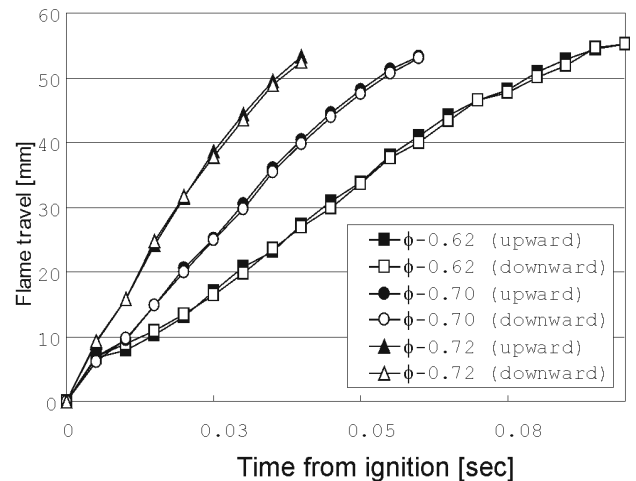
Szybkość spania S_u można ocenić posługując się równaniem (1):

$$S_u = (\rho_b / \rho_u) \times S_f \times I = (T_u / T_b) \times S_f \times I \quad (1)$$

gdzie ρ_u i ρ_b są odpowiednio gęstościami niespalonego i spalonego gazu, a temperatura T_b spalonego gazu określona jest przy założeniu równowagi chemicznej przy stałym ciśnieniu w warunkach przemiany adiabatycznej [3, 4], natomiast I jest współczynnikiem poprawkowym dla grubości płomienia [5].

Na rysunku 8 pokazano wartość szybkości spalania mieszanin DME i powietrza w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza wyznaczonego na podstawie wzoru (1) przy ciśnieniu początkowym 0,10 MPa i temperaturze początkowej 293 K. Prędkość rozchodzenia się płomienia S_f wyrażona równaniem (1), to prędkość uzyskana podczas testu w warunkach zmniejszonego ciężenia. Prędkość spalania mieszanin metanu i propanu z powietrzem wyznaczone we wcześniejszych badaniach autorów pokazano na rysunku 8 [3].

Jak można zauważyć, na tym rysunku prędkości spalania mieszanin DME i powietrza maleją monotonicznie wraz ze spadkiem wartości współczynnika j i wynoszą odpowiednio 10 cm/s oraz 31cm/s dla wartości tego współczynnika



Rys. 6. Charakter rozchodzenia się płomienia mieszank DME i powietrza w warunkach normalnej grawitacji (zasięg płomienia z funkcji czasu od zapłonu)

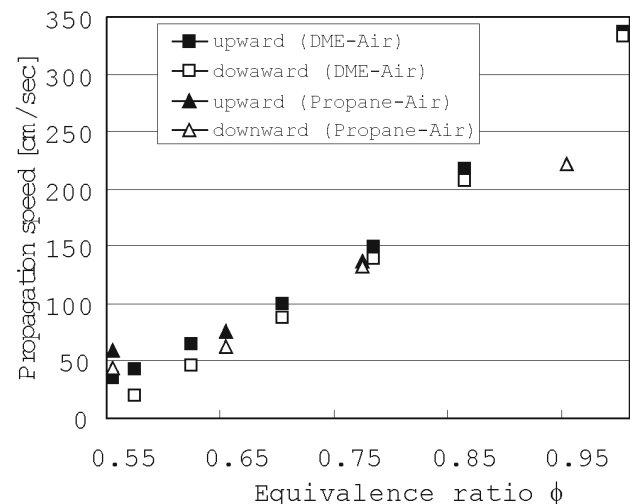
Fig. 6. Flame travel behavior of DME fuel-air mixtures under microgravity under normal gravity

becomes larger accompanying with the decrease of equivalence ratio due to the effect of natural convection, though both of these speeds decreases with decreasing equivalence ratio. Such a combustion behavior of DME fuel-air mixture is not so different from that of methane-air and propane-air mixture at all the equivalence ratio studied [3].

The burning velocity S_u can be estimated by following equation (1),

$$S_u = (\rho_b / \rho_u) \times S_f \times I = (T_u / T_b) \times S_f \times I \quad (1)$$

where ρ_u and ρ_b are density of unburnt and burnt gases, respectively and temperature T_b of burnt gas are estimated assuming the chemical equilibrium at constant pressure and under the adiabatic flame condition[3,4], and I is correction factor for flame thickness [5].



Rys. 7. Prędkość rozchodzenia się płomienia mieszanki DME i powietrza w warunkach normalnej grawitacji

Fig. 7. Flame propagation speed of DME fuel-air mixtures under normal gravity

0,62 i 0,90. Są to prawie takie same wartości, jak w przypadku spalania metanu dla tego samego współczynnika równowagi, choć ilość wydzielonego ciepła ze spalania DME jest dwa razy mniejsza niż w przypadku metanu [4].

Co istotne, szybkość spalania jest wprost proporcjonalna do iloczynu ciepła wydzielonego podczas spalania i dyfuzyjności cieplnej mieszanki paliwowej.

W przypadku DME dyfuzyjność cieplna jest większa w porównaniu z dyfuzyjnością mieszanki metanu, choć ilość ciepła wydzielonego podczas spalania DME jest o połowę mniejsza.

4. Wnioski

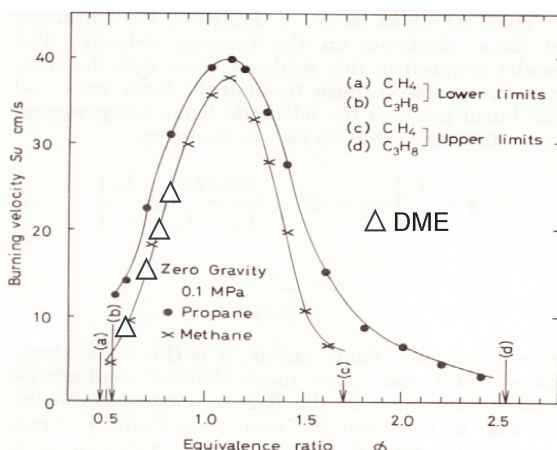
Najistotniejsze wnioski, jakie uzyskano na podstawie przeprowadzonych badań są następujące:

Technika mikorograwitacji jest najlepszą metodą dla uzyskania podstawowych charakterystyk spalania mieszanin DME i powietrza, szczególnie w zakresie mieszanek ubogich;

Szybkość spalania mieszanin DME i powietrza maleje monotonicznie ze spadkiem wartości współczynnika nadmiaru powietrza, a wartości są prawie takie same, jak w przypadku mieszanin w całym zakresie analizowanych wartości współczynnika nadmiaru powietrza;

Na podstawie uzyskanych wyników można zakładać, że spalanie DME w silniku spalinowym nie jest niemożliwe.

Artykuł recenzowany



Rys. 8. Szybkość spalania mieszanin DME z powietrzem w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza

Fig. 8. Burning velocity of DME fuel-air mixtures versus equivalence ratio

In Fig. 8 is shown the value of the burning velocity of DME fuel-air mixtures against equivalence ratio, which is estimated from equation (1) at an initial pressure of 0.10MPa and at an initial temperature of 293 K, where the flame propagation speed S_f expressed in equation (1) is those obtained by micro-gravity experiment. Where the burning velocities of propane-air and methane-air mixtures obtained from previous our experiments are also shown in Fig. 8 [3].

As seen from this figure the burning velocities of DME fuel-air mixtures monotonically decrease with decreasing equivalence ratio and the values of burning velocities are 10 cm/s and 31cm/s at 0.62 and 0.90 of equivalence ratio, respectively. These values are nearly the same with those of methane-air mixtures at same equivalence ratio,

though the value of combustion heat of DME fuel is about 60% of that of methane [4].

Essentially, the burning velocity is proportional to the product of the heat value of combustion and thermal diffusivity of fuel mixture. In the case of DME fuel the thermal diffusivity is larger, comparing with that of methane-air mixture and consequently the burning velocity of DME fuel is not so different from that of methane-air mixture, though the heat value of combustion of DME fuel is about 60% of that of methane.

4. Conclusion

The main results obtained in the study are as follows: (1) The micro-gravity technique is the most suitable method to extract the essential combustion characteristics of DME fuel-air mixtures, especially near the very lean side of mixtures, (2) The burning velocity of DME fuel-air mixtures monotonically decreases with decreasing equivalence ratio and these values are nearly the same with those of methane-air mixtures at all the equivalence ratios studied, and (3) From these experimental data it may be suggested that the application to the engine combustion of DME fuel is not so impossible.

Literatura/Bibliography

- [1] Okajima S., Inums K., Kumagai S.: Measurement of slow burning velocities and their pressure dependence using a zero-gravity method. Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.1951-19561 (1984).
- [2] Okajima A., Kazaoka K., Okajima S.: Micro-gravity Observation on Combustion Behavior of Solid Waste Fuels in High Temperature and Low Oxygen Atmosphere. Bulletin of Faculty of Engineering, Hosei University, Vol.38, pp1-5 (2002).
- [3] Okajima S., Kawakami T., Inuma K.: Measurement of slow burning velocity by zero-gravity method. Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.1600-1609 (1988).
- [4] Lewis B., von Elbe G.: Combustion, Flame and Explosion of Gases. Academic Press, New York and London (1961), p.691.
- [5] Andrews G. E., Bradley D.: The Burning Velocity of Methane-Air Mixtures. Combustion and Flame, Vol.18, pp.133-142 (1972).

* Prof. dr Satoshi Okajima – Profesor na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Hosei, Tokio, Japonia.
Mr Satoshi Okajima, Ph.D. – Professor at the Faculty of Engineering, Hosei University, Tokyo, Japan.

