

Mecanismo para medir temperatura en la cara del pistón de un motor de combustión interna

Device to measure temperature on piston top of an internal combustion engine

J. O. Araque M.*, S. Fygueroa S., y M. Martín V.
GRUMOTE. Escuela de Ingeniería Mecánica. ULA.
Mérida, 5101, Mérida
*jaraque@ing.ula.ve

Resumen

En este trabajo se desarrolla un sistema práctico para realizar mediciones de temperatura superficial en la cara del pistón de un motor de gasolina. El trabajo se divide en dos partes, la primera muestra lo referente al diseño del sistema y la segunda trata de la simulación del cambio de temperatura en la superficie del pistón. El mecanismo consiste de un juego de "cabezales de pistón" instrumentados con cuatro termopares tipo hierro-constantan montados en la parte superior, dos de los cuales poseen una segunda junta colineal colocada a una cierta profundidad, la cual permite calcular la cantidad de calor transferido a través de la cabeza del pistón. Material cerámico incrustado se usa para investigar la influencia que tienen las condiciones de aislamiento sobre el desarrollo de la temperatura superficial y sobre la variación de potencia producida. Un proceso de simulación empleando datos reales de presión tomados en el cilindro del motor a 1800 rpm es usado para predecir el cambio de temperatura en la cara del pistón utilizando un modelo de transferencia de calor unidimensional a través de dos materiales: metal y aislante. Como condiciones de frontera se fijan: una fuente de calor variable en la parte superior y una temperatura de pared constante en la parte inferior. Los resultados de la simulación muestran buena concordancia con los observados en trabajos similares. El perfil de temperatura en la cara del pistón revela un crecimiento repentino de la misma de acuerdo a lo esperado como efecto directo del proceso de combustión.

Palabras claves: Temperatura superficial, cabezal del pistón, termopares superficiales, transferencia de calor, motor de combustión interna.

Abstract

In this work a simple mechanism is made to do temperature measurements on a piston face of a gasoline engine. Two main tasks are considered, the first accounts all about the mechanism design, and the second deals with the aspects related to surface temperature simulation. The device has several piston heads with surface thermocouples inbeded on each one, two of these devices have a cold junction to allow for heating transfer measurements across the piston head. To investigate the thermal insulation effects on engine power development a ceramic material plate was inserted between the engine piston top and its piston head. Real engine cylinder pressure data taken at 1800 rpm was used to simulate the surface temperature change when metal and ceramic conform the piston head. The one dimensional heat transfer model has a variable source of heat flux as a top border condition and a constant wall temperature on its bottom side. The obtained results agree with others authors experiments. The surface temperature profile shows a suddenly temperature increase according to the engine combustion process into the cylinder.

Key words: Surface temperature, piston head, surface thermocouple, heat transfer, internal combustion engine.

1 Introducción

El desarrollo del proceso de combustión en motores alternativos es complejo y por lo tanto el empleo de técnicas que permitan el estudio de variables para caracterizarlo es muy importante. Los métodos de simulación de la variación de temperatura en las paredes de la cámara de combustión (Yohiteru et. al. 1985, Borman et. al. 1987) han contribuido en forma sustancial con la identificación del proceso de combustión. Una técnica más común usada en la medición experimental de temperatura superficial en cámaras de combustión de motores consiste en el empleo de termopares empotrados en las paredes. Adicionalmente, el empleo de termopares colocados a cierta profundidad en dependencia de las características de penetración térmica del material permite calcular la cantidad de calor transferido por conducción. Sin embargo las condiciones reales de trabajo existentes en la cámara de combustión de motores exigen ciertas consideraciones especiales con respecto al tamaño y colocación de la junta medidora y propiedades termofísicas de los materiales de dicha junta a fin de garantizar que durante la toma de datos se registren los cambios reales de temperatura y sus valores correctos. Para minimizar los errores de medición es indispensable que los materiales del termopar tengan propiedades termofísicas (conductividad térmica y difusividad térmica) similares a las del material de la superficie donde se desea medir la temperatura, Yohiteru (1885), Furuhamu (1988).

Se diseñaron y construyeron una serie de cabezales de pistón instrumentados con un grupo de termopares, a fin de determinar experimentalmente la variación de temperatura superficial, durante el desarrollo del ciclo de trabajo de un motor ECH. En el diseño se emplearon termopares hierro-constantan como el más adecuado de acuerdo al tipo del material del pistón. Los cabezales del pistón presentan dos tipos de configuraciones: una configuración llamada normalizada de pistón con cabezal de metal y otra de pistón y cabezal con cerámica incrustada. Estos dispositivos se usaran en ensayos para estudiar la influencia de la reducción de pérdida de calor a través de la cara del pistón, sobre el incremento de temperatura superficial.

Para determinar teóricamente el incremento de temperatura superficial en la cara del pistón se utiliza el método implícito aplicado a un modelo unidimensional que trabaja con diferencia finita. El método estudia el efecto de aislamiento térmico en la cara del pistón usando diferentes espesores de metal y aislantes cerámicos. El cambio rápido de la temperatura en la dirección perpendicular a la superficie justifica un estudio transferencia de calor por conducción a través de las paredes modelado mediante el uso de un programa que utiliza una distribución de nodos en esa dirección.

El modelo empleado considera el efecto de cambio de propiedades termofísicas del material por efecto de la variación de la temperatura, por lo tanto puede usarse para estimar los incrementos de temperatura en el metal depen-

diendo de las propiedades termofísicas del mismo y del aislante térmico.

En el proceso de simulación se usó información sobre cambios de presión real en el cilindro del motor, así como valores de coeficientes de película obtenidos mediante la correlación empírica de Woschni. Los resultados obtenidos por simulación se hallaron usando dos valores de riqueza, $\phi=0.82$ y $\phi=1.0$ correspondientes a los datos de presión utilizados. Estos resultados muestran muy buena correlación con los obtenidos por otros autores en ensayos teóricos similares. El gran incremento de temperatura observado en la superficie del metal cuando se emplean cerámicas desde 1mm hasta 4mm de espesor respecto a condiciones sin aislamiento, permite realizar análisis teóricos sobre la dependencia de la potencia desarrollada por el motor como función de la disminución de las pérdidas de calor y de los cambios en el rendimiento volumétrico del motor.

2 Reseña teórica

Estudios (Bradish et. al. 1966) sobre medición de temperatura superficial en motores de combustión interna (MCI) demuestran que la presencia de depósitos acumulados en las paredes ocasionan disminución de la temperatura superficial debido a las propiedades térmicas (ρ , k , α , ρC_p) con características aislantes de estos depósitos. Alkidas (1982) realizó mediciones de temperatura en las paredes de la cámara de combustión usando un arreglo de termopares distribuidos coaxialmente, una junta colocada en la superficie (junta caliente) y otra colocada a cierta profundidad de la superficie dependiendo de la penetración térmica del material (junta fría). Los trabajos de investigación realizados por Heywood (1985), Assanis (1987), Kamo (1989) y Rasihhan (1991) empleando materiales cerámicos en motores de combustión interna señalan varios aspectos relacionados con la pérdida de calor a través de paredes aisladas térmicamente. Trabajos similares (Cheng 1990) muestran que la mayor influencia sobre la temperatura superficial de pared se debe a las fluctuaciones de la composición de la mezcla y temperatura del refrigerante, indicando que las máximas temperaturas se obtienen para riquezas, $\phi = 1.0$, lo que a su vez disminuye la acumulación de depósitos. Los trabajos experimentales de Nakic (1994) y Araque (1995) muestran el comportamiento del perfil de temperatura superficial en la cara del pistón de un motor CFR de gasolina obtenido a partir de mediciones realizadas con un grupo de cuatro termopares empotrados en un cabezal de pistón.

3 Instrumentación del pistón

Basado en los trabajos de Assanis et al (1987, 1989) y Borman (1987), sobre medición de temperatura superficial en las diferentes zonas de la cámara de combustión se desea diseñar y construir una serie de cabezales instrumentados con un grupo de termopares, para determinar experimentalmente las variaciones de temperatura superficial durante

el desarrollo del ciclo de trabajo de un MECH. La exactitud de los ensayos es muy importante por lo que los termopares deben suministrar la información de los cambios de temperatura que se producen en la superficie del pistón en tiempo real.

Para estudiar la influencia que tienen las pérdidas de calor sobre la potencia producida en el cilindro del motor se diseñaron y construyeron dos tipos de configuraciones: una configuración llamada normalizada de pistón con cabezal de metal y otra de pistón y cabezal con cerámica incrustada de varios espesores. De esta manera estos cabezales se pueden emplear en un rango amplio de medición de temperatura, correspondientes a condiciones de trabajo en el motor con diferentes valores de relación combustible-aire.

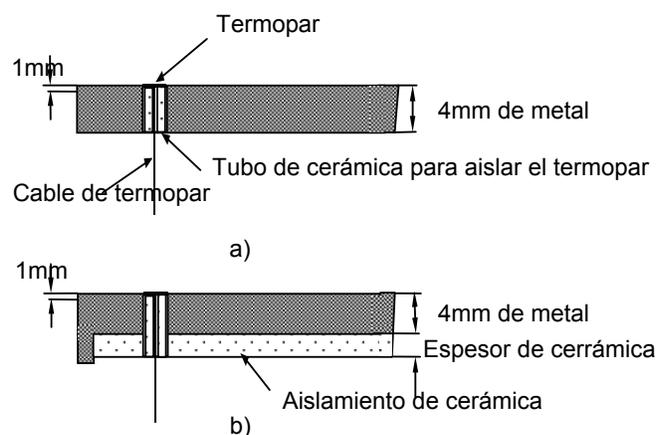


Fig. 1. Cabezales de pistón a) Normalizado de metal b) Con cerámica incrustada.

3.1 Cabezal normalizado de metal

Se diseño y construyo de un material con propiedades termofísicas similares a las del pistón del motor, $K=54$ W/(m K), $\rho=7593$ Kg/m³, $C_p=460.24$ J/(Kg. K). El diámetro de los cabezales corresponde al diámetro del pistón (82 mm) con un espesor mínimo 4mm para facilitar la sujeción del mismo a la cabeza del pistón. Cuatro perforaciones distribuidas simétricamente en la cara del pistón y ubicadas en dirección de las nervaduras del mismo fueron hechas para la sujeción del cabezal, ver figura 1.

3.2 Cabezal con cerámica incrustada

En la figura 1 se observa el conjunto paralelo cabezal con placa de cerámica incrustada (Un disco de cerámica de 74.4 mm de diámetro externo); la parte de metal posee las mismas especificaciones en cuanto a diámetro, espesor, material y perforaciones que el normalizado de metal. Para realizar varios estudios de aislamiento térmico se escogie-

ron discos cerámicos de 1, 2, 3, y 4 mm de espesor respectivamente.

4 Suposiciones del modelo

Con la finalidad de estudiar los efectos del proceso de combustión sobre la distribución de temperatura, tanto en la superficie del pistón como a cierta profundidad del metal se procede a utilizar la distribución de nodos mostrada en la figura 2. En la misma se observan las condiciones de frontera para una sección transversal del conjunto. Se plantea como condición de borde en la parte superior de la cara del pistón una variación en función del tiempo del flujo de calor superficial (q) en función del cambio de la temperatura de los gases (T_g) y del coeficiente promedio de transferencia de calor (H_g), la parte inferior del pistón es sometida a transferencia de calor por convección con el aceite del motor, que mantiene una temperatura de pared aproximadamente constante.

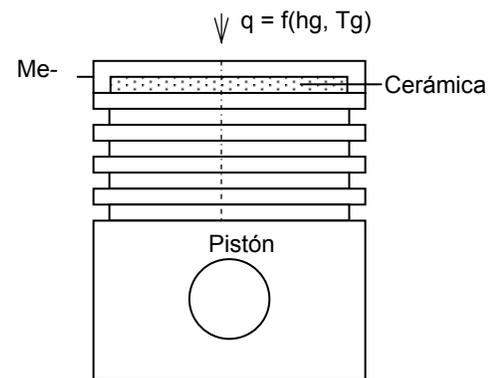


Fig. 2. Esquema pistón-cabezal mostrando el sentido del flujo de calor y la ubicación de los nodos de temperatura.

5 Ecuaciones

Para el nodo superior con flujo variable de calor por convección, se tiene la Ec. (1):

$$T_m^{i+1} = \frac{2FoT_m^{i-1} - 2Foq_{conv} \frac{\Delta x}{K_1} + T_m^i}{1 + 2Fo} \quad (1)$$

$$q_{conv} = h(T_g - T_p) \quad (2)$$

donde: F_o = numero de Fourier, q_{conv} = calor por convección, K_1 = conductividad térmica del metal, Δx = espaciamento entre nodos, T_g = temperatura de los gases, T_m = temperatura del nodo en estudio y T_{m-1} = temperatura en el nodo anterior.

Para los nodos internos considerando el cabezal del pistón esta formado por un solo tipo de material se tiene la

Ec. (3):

$$T_m^{i+1} = \frac{FoT_{m-1}^{i+1} - FoT_{m+1}^{i+1} + T_m^i}{1 + 2Fo} \quad (3)$$

donde: T_{m+1} = temperatura en el nodo posterior.

Para los nodos internos trabajando con dos tipos de materiales se tiene la Ec. (4):

$$T_m^{i+1} = \frac{K_2 T_{m-1}^{i+1} - K_1 T_{m+1}^{i+1} + (\rho x C_x \Delta C^2 / \Delta t) T_m^i}{\Delta x^2 / \Delta t + K_1 + K_2} \quad (4)$$

donde: K_2 = conductividad térmica del aislante, Δt = tiempo, ρx = densidad, C_x = calor específico del material.

La Ec. (5) para el nodo inferior con una condición de temperatura de pared constante:

$$T_m^{i+1} = T_p = constante \quad (5)$$

donde: T_p = temperatura de pared.

6 Resultados

En la figura 3 se muestran resultados de la simulación para $\phi = 0.82, 0.92$ y 1.00 con sus temperaturas de pared correspondientes. La simulación de temperatura en la superficie del metal se hizo sin considerar el empleo de material aislante intermedio, se observa en el perfil de temperatura la tendencia hacia mayores diferencias de temperatura cuando se incrementa la riqueza de la mezcla.

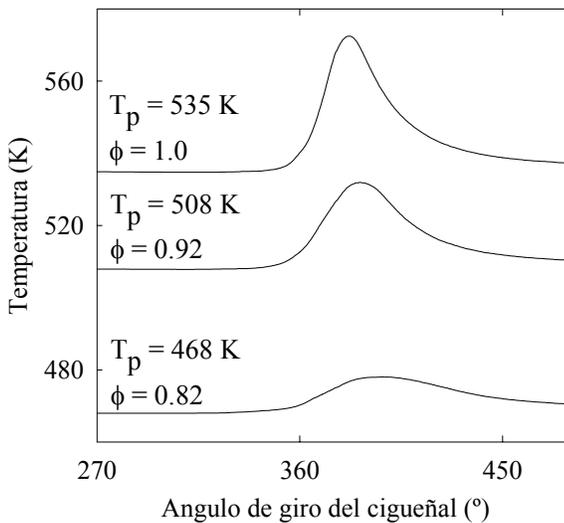


Fig. 3. Temperatura superficial en cabezal de metal.

Para el instante del proceso de combustión se tienen crecimientos suaves de temperatura para el caso de trabajo en el motor con mezclas pobres y crecimientos mas acelerados en los casos de mezclas ricas. El empleo de datos reales de presión tiene influencia sobre el perfil de temperatura debido a la existencia inevitable de fluctuaciones propias del proceso de combustión.

La simulación de temperatura superficial con cerámica intermedia de 3 mm de espesor se presenta en la figura 4. Se tienen mayores cambios de temperatura como efecto del proceso de combustión respecto a los mostrados en la figura 3, lo cual es consecuencia directa de la reducción de la pérdida de calor. El efecto del aislante se observa cuando para una misma riqueza se alcanzan niveles de temperatura de pared mas elevados respecto al caso sin aislamiento.

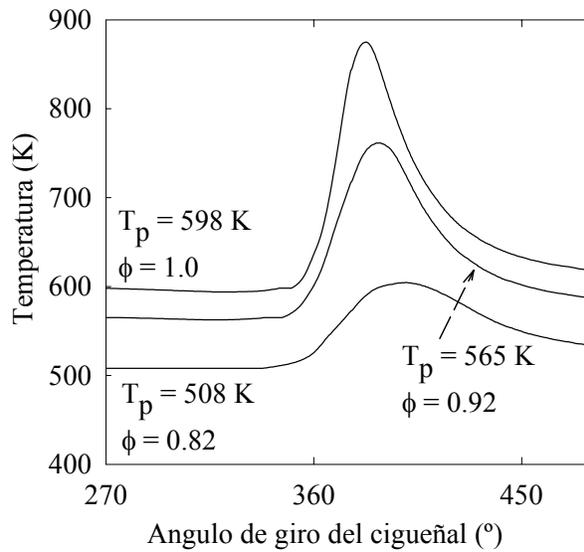


Fig. 4. Temperatura superficial en cabezal de metal con placa cerámica intermedia.

La figura 5 muestra los resultados correspondientes a la diferencia de temperatura en función de la riqueza de la mezcla para los casos de metal y metal más cerámica intermedia

Se puede ver claramente que con el empleo de la cerámica intermedia existe un salto de temperatura mucho mayor para cada valor de riqueza utilizado en comparación con el caso de solo metal de hierro. Para los datos utilizados en la simulación la tendencia es creciente con el incremento de la riqueza de la mezcla combustible-aire, sin embargo es de esperar que este crecimiento se irá haciendo menor en la medida que el motor requiera trabajar con riquezas mayores que 1.1 debido a los problemas relacionados con la disociación del CO_2 .

En la figura 6 se muestra la diferencia de temperatura alcanzada en función de la temperatura de pared y trabajando con una mezcla estequiométrica. Se observa que el efecto de la temperatura sobre las propiedades térmicas del

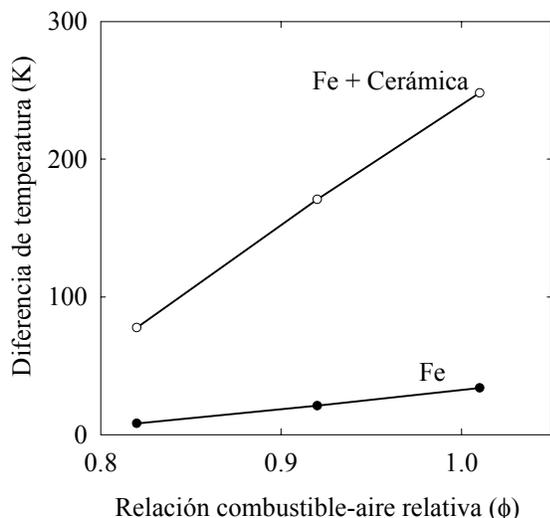


Fig. 5. Diferencia de temperatura vs riqueza.

material es más notable para los casos de empleo de material aislante intermedio. La simulación muestra que en la medida que la temperatura promedio del metal aumenta existe un salto de temperatura menor en las cercanías del PMS, correspondiendo esto a la disminución de la conductividad térmica del material. Este tipo de variaciones de la temperatura superficial se observa en el trabajo de Kamo (1989), el cual reporta saltos de temperatura del orden de los 220°C para condiciones similares de simulación.

7 Conclusiones

Se diseñaron y construyeron dos configuraciones de cabezal de pistón para medir experimental el cambio de temperatura superficial en la cara del pistón.

Los resultados de variación de temperatura superficial obtenidos usando un modelo de transferencia de calor que trabaja con valores de presión medidos en el cilindro de un motor muestran buena concordancia con los observados en trabajos similares de investigación.

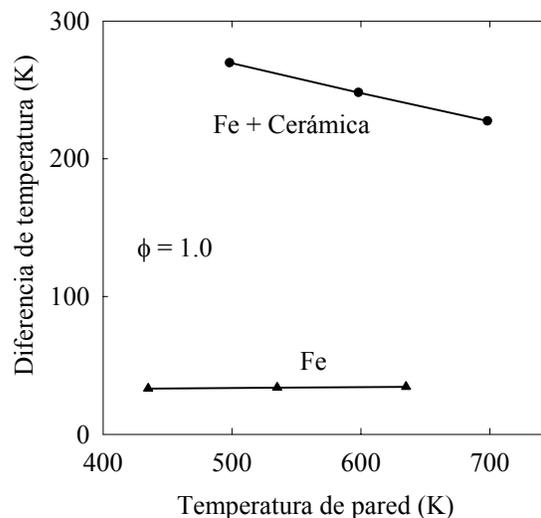
Los resultados de la simulación indican la importancia que tiene el cambio en la conductividad térmica del material por efecto de las variaciones de temperatura en la cámara de combustión sobre la determinación de la temperatura superficial de las paredes.

El empleo de aislamiento térmico eleva la temperatura promedio de la pared, lo que ocasiona disminución en el rendimiento volumétrico de MCI.

El modelo puede ser usado para determinar teóricamente el espesor de aislante necesario correspondiente a un incremento de temperatura superficial deseado.

Recomendación

Es recomendable la continuación del trabajo con la finalidad de encontrar el comportamiento real de la tem-

Fig. 6. Diferencia de temperatura vs T_{pared} .

peratura superficial del pistón usando estos dispositivos para medición de temperatura y además con la intención de validar el modelo de transferencia de calor que se usó para predecir estos cambios de temperatura.

Agradecimientos

Los autores manifiestan su agradecimiento al CDCHT de la Universidad de Los Andes por su apoyo financiero mediante el Proyecto I-571-97-02-B.

Referencias

- Alkidas, A.C. y Myers, J.P. 1982, "Transient Heat Flux Measurements in the Combustion Chamber of a Spark Ignition Engine", *Transactions of the ASME*, vol. 104.
- Araque, M.J. 1995, "Study of Air Fuel Ratio Effects on Piston Surface Temperature and Deposit Development in a Spark Ignition Engine", M.Sc. Thesis, University of Illinois, Urbana.
- Assanis, D. y Badillo, E. 1989, "On Heat Transfer Measurements in Diesel Engines Using Fast Response Coaxial Thermocouples", *Transactions of the ASME*, vol. 111, pp. 458-465.
- Borman, G. y Nishiwaky, K. 1987, "Internal Combustion Engine Heat Transfer", *Proc. Energy Combust. Srl.*, vol. 13, pp. 1-46
- Bradish, J.P., Myers, P.S. y Uyehara, O.A. 1966, "Effects of Deposit Properties on Volumetric Efficiency, Heat Transfer, and Preignition in Internal Combustion Engines", *SAE Paper 660130*.
- Cheng, S.S. y Kim, C. 1990, "Effect of Engine Operating Parameters on Engine Combustion Chamber Deposits", *SAE Paper 902108*.
- Furuham, S. y Enomoto, Y. 1988, "Heat Transfer into Ce-

- ramic Combustion Wall of Internal Combustion Engines”, *SAE Paper 870153*.
- Heywood, J.B. 1985, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw Hill, Inc.
- Kamo, R., Assanis, D.N. y Bryzik, W. 1989, “Thin Thermal Barrier Coatings for Engines”, *SAE Paper 890134*.
- Nakic, D.J. 1994, “*Investigation of Wall Temperature Effects on Combustion Chamber Deposit Growth*”, M.Sc. Thesis, University of Illinois, Urbana.
- Rasihhan, Y. y Wallace, F.J. 1991, “Temperature Transients on Engine Combustion Chamber Wall III. Application of the Finite Difference Model to Various Metal and Ceramic Walls”, *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 33, No 11, pp. 863-874.
- Yohiteru, E. y Shoichi, F. 1985, “Study on Thin Film Thermocouple for Measuring Instantaneous Temperature on Surface of Combustion Chamber Wall in Internal Combustion Engine”, *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 28, No 235.