

정적 연소기에서 당량비 변화에 따른 순간열유속에 관한 연구

이 치 우[†]

(원고접수일 : 2003년 5월 20일, 심사완료일 : 2003년 6월 3일)

A Study of Heat Flux and Instantaneous Temperature According to the Equivalence Ratio in a Constant Volume Combustion Chamber

Chi-Woo Lee[†]

Key words : Instantaneous temperature probe(순간온도 프로브), Constant volume combustion chamber(정적연소기), Wall heat flux(벽면 열유속)

Abstract

In the gasoline engine industry, there has been a trend towards the development of high performance engines with improved fuel efficiency, reduced weight and smaller sizes. These trends help to solved engine problems related to thermal load and abnormal combustion. In order to investigate these problems, a thin film-type probe for instantaneously measuring temperatures has been suggested. A method for manufacturing such a probe was established in this study. The instantaneous surface temperature of a constant volume combustion chamber was measured by this probe and the heat flux was obtained through Fourier analysis. A peak instantaneous temperature was obtained after 55~60 ms from ignition and the temperature increased according to an equivalence ratio and varied differently according to the position of the probe. Total heat loss during combustion period was affected by the equivalence ratio and differed widely in accordance to the position of the probe.

1. 서 론

최근 자동차 내연기관 분야에서는 고출력을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 고출력으로 인한 공급열량의 증가는 출력과 열부하를 동시에 증가시키므로 그에 따른 연소실 내부와 구성품들에 대

한 열적 거동이 반영된 최적의 설계가 요구된다.

연소실 구성부품들은 높은 온도에 노출되어 있으며, 그 온도의 분포가 일정하지 않다. 따라서, 연소실 벽면은 열응력에 의한 피로파괴를 일으키는 온도 이하로 유지되어야 한다. 알루미늄의 경우 573 K이하의 상태를 유지해야 하고, 연소실 벽면

[†] 책임저자(마산대학 기계자동차공학부) E-mail : cwlee@masan.ac.kr, T : 055)230-1323

은 윤활유의 산화 등으로 인해 점성이 저하되므로 이를 방지하기 위해 약 453 K보다 낮게 유지해야 한다.

연소시 발생하는 가스온도의 변화에 의해 비정상적으로 변화하는 연소실 벽면의 순간온도는 응답성이 빠른 박막형 순간온도 프로브(instantaneous surface temperature probe)¹⁾를 이용하여 측정할 수 있다. 연소실내 연소가스로부터 연소실 벽면으로의 열손실 상태를 명확하게 규명하는 것은 내연기관의 열부하 대책 및 열손실 저감을 통한 열효율 향상을 위해 필요하다.

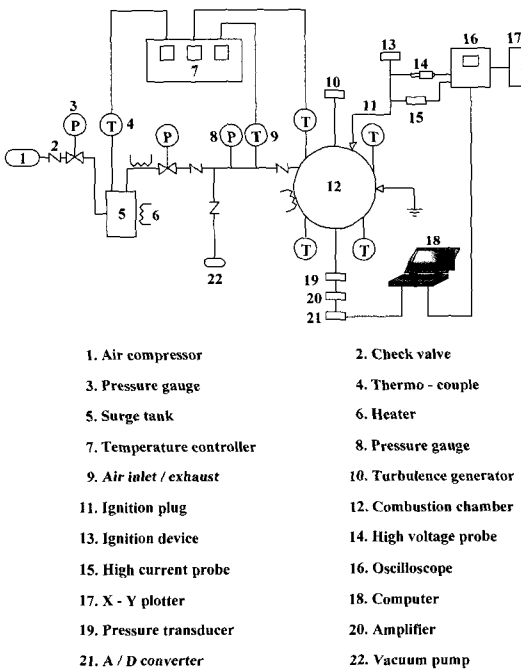


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

따라서, 본 연구에서는 정적연소기(constant volume combustion chamber)내에서 박막형 순간온도 프로브의 측정위치 및 주어진 당량비 조건에서 혼합기를 연소시킬 때의 경과시간에 따라 연소실 내벽면의 순간온도를 측정한다. 이 결과를 이용하여 제 조건에 따른 연소특성의 해석, 연소실 벽면에서의 최고순간온도, 화염의 이동특성에 따른 순간온도의 분포 및 비정상 순간열유속 등을

산출하여 연소실 벽면으로 유출되는 손실 총열량을 밝히고자 한다.

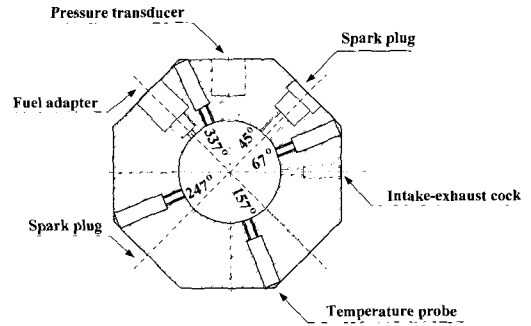


Fig. 2 Schematic diagram of constant volume combustion chamber.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치 및 실험조건

본 실험장치는 정적연소기, 점화장치, 공기 공급장치, 연소실 벽면온도 측정장치²⁾, 각종 제어 및 계측장치로 구성되어 있다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 연료가 산화하는 연소과정에서 순간온도를 측정하는 과정은 매우 복잡한 현상들을 수반하기 때문에 65×60 mm 연소체적 199.1 cc의 정적연소기³⁾를 사용하여 실험하였다. 사용연료는 가솔린이며, 연소시 발생하는 순간온도와 순간압력은 250 kHz A/D변환 장치로써 데이터를 취득하였다.

Fig. 2는 압력계, 순간온도 프로브 등을 장착한 정적연소기이다. 이 때 순간온도 프로브는 압력계를 기준으로 67°, 157°, 247°, 337°의 방사형으로 설치⁴⁾하였다.

Fig. 3은 검정선도상의 온도에 대한 기전력의 기울기 값으로 프로브의 기전력을 온도로 환산하였다. 순간온도 프로브 소선의 길이, 연결부 및 데이터 취득장치 또한 자체저항을 갖고 있으므로 전체를 하나의 저항체로 가정하고, 측정부위인 순간온도 프로브와 표준온도계를 함께 전기로에 넣은 다음 온도차를 크게 가변하면서 표준온도계의 온도와 순간온도 프로브로부터 취득되는 기전력으로

부터 온도환산계수를 결정하고자 하였다. 동일한 방법으로 모든 순간온도 프로브에 대하여 검정을 실시한 기전력에 대한 온도환산계수는 각각 26.6 K/mV였다.

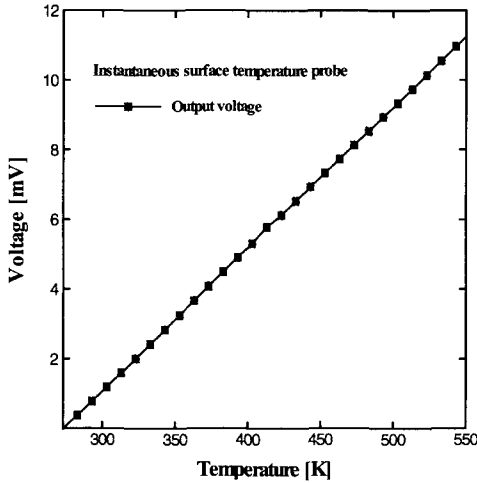


Fig. 3 Calibration chart of temperature probe.

것으로 접점부의 두께를 최소화하여 연소실 벽면의 순간온도를 시간지연 없이 측정할 수 있도록 열접점부를 5~6 μm의 두께로 금박막(gold thin film)한 다음, 그 위에 연소실 내부의 산화 성분위기에 견딜 수 있도록 1~2 μm 두께의 무전해 니켈도금으로써 내구성을 향상시키고자 하였다. 순간온도 프로브의 모재는 정적연소기와 동일한 재료로서 Al6063을 φ 3.0×40 mm로 제작하였고, 열전대는 φ 0.3 mm의 K-type을 사용하였다. 모재의 축방향으로 φ 0.5×40 mm 두 개의 구멍을 가공한 다음 테프론으로 코팅된 Chromel과 Alumel 열전대 소선을 직접 끼워 넣은 다음 롤러(Roller)에 압착시키므로 금으로 증착될 부분은 전기절연 물질에 의한 비절연의 부분이 거의 없는 상태에서 접점부를 형성하였다.

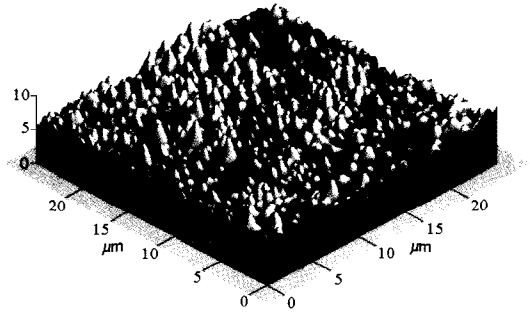


Fig. 5 Photograph showing the measured thickness of the junction.

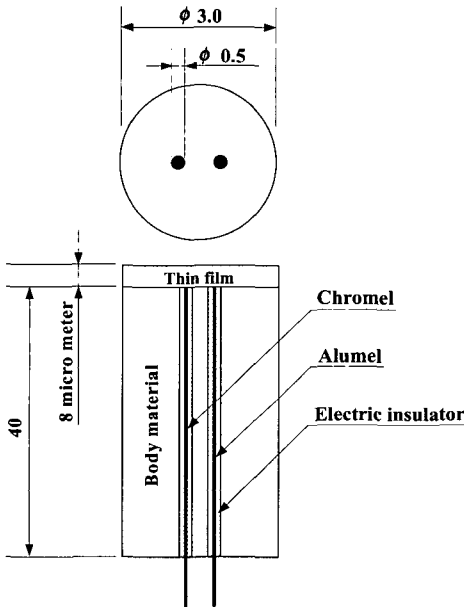


Fig. 4 Schematic of the instantaneous temperature probe used K-type thermocouple.

Fig. 4는 본 연구에서 사용한 순간온도 프로브이다. 순간온도 프로브는 Seebeck 효과를 응용한

Fig. 5는 순간온도 프로브 접점부의 두께를 계측한 사진이다. 접점부의 두께는 응답성을 결정하는 중요한 인자이므로 본 연구에서는 분해능력(resolution)이 1.0 nm인 전계방사형 주사전자현미경(field emission scanning electron microscope)을 사용하여 접점부의 두께를 확인하였다.

2.2 실험방법

탈습된 공기를 363 K의 온도로 가열한 다음 공기 압축기를 이용하여 0.5 MPa의 압력으로 정적연소기의 연소실에 주입시키고, 설정된 양만큼의 가솔린을 분사 시작으로부터 260 ms 후에 점화장

치에 의해 점화되도록 하였다. 연소압력 및 연소실 벽면의 순간온도는 정적연소기에 설치된 압력변환기와 순간온도 프로브에 의해서 측정된다.

Table 1 Initial conditions of experiment.

Parameters	Conditions
Ignition temperature	363 K
Ignition pressure	0.5 MPa
Fuel	Gasoline
Ignition method	CDI

Table 2 Experimental conditions.

Parameters	Conditions
Height of probe	0 mm
Premixed duration	260 ms
Position of probe	67°, 157°, 247°, 337°
Equivalence ratio	1.0

Table 1은 실험의 초기조건을 나타내고, Table 2는 연료분사 후 점화시기까지의 실험조건⁵⁾을 나타내며, 모든 계측 및 제어를 위해 P/C를 사용하였다. 본 실험에서는 동일한 실험조건에서 선행한 압축공기 초기점화온도 353 K일 경우의 연구결과⁶⁾와 비교하고자 하였다.

순간온도 프로브의 돌출높이(Height of Probe) HP=0 mm, 예혼합기간(Premixed Duration : PD)는 분사된 연료가 충분히 기화된 후 재현성 있는 연소가 이루어지도록 260 ms로 설정하였고, 순간온도 프로브의 장착위치(Position of Probe) PP=67°, 157°, 247°, 337°에서 당량비(Equivalence Ratio) ER=0.8, 1.0, 1.2의 조건으로 실험을 행하였다. 데이터를 Fourier 급수로 전개하는 데 있어 Gibbs 현상을 벗어난 구간에서 Fourier 급수 전개에 의한 평균오차는 $1 \times 10^{-5} \%$, 최대오차는 4.7% 이내였다⁷⁾.

3. 실험결과 및 검토

3.1 순간온도 특성

Fig. 6은 순간온도 프로브의 장착위치(PP) 및

당량비(ER)에 따라 주어진 초기조건에서 순간온도의 특성을 알아보기 위하여 연소시 발생하는 순간온도를 500 ms동안 1,000개의 데이터로써 취득한 결과이다. A점은 점화시기, B점은 순간온도 상승시기, C점은 최고순간온도 발생시기, D점은 관찰 끝부분이다. 본 연구에서는 연료분사개시부터 점화시기까지를 PD, A점에서 D점까지의 연소에 의한 순간온도의 분포로 구분할 수 있다. A점에서 C점까지의 순간온도 분포로부터 본 연구에서 사용한 순간온도 프로브 응답특성의 재현성 및 고 응답성을 확인하였다. 이는 제작과정에서 적열방전에 의한 친수화 처리로 인하여 모재의 오염도를 줄여 박막을 형성하였고, 또한 기존의 전기절연 물질인 세라믹(ceramic)의 경우 전기절연의 성능은 우수하나, 금 증착시 박막과의 친화성이 없으므로 연소실내의 고압과 고온의 상태에 노출되면 금 박막과 세라믹의 분리가 진행되는 것으로 인하여 측정되는 순간온도에 대한 신뢰성 문제 및 내구성에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 금으로 증착될 부분은 전기절연 물질에 의한 비절연의 부분이 거의 없는 상태이므로 금 박막의 두께를 얇게 증착할 수 있어 응답성과 내구성을 향상시키고, 신뢰할 수 있는 순간온도를 취득할 수 있었다. 이때 금박막의 두께는 선행된 연구결과⁸⁾를 참고하였다.

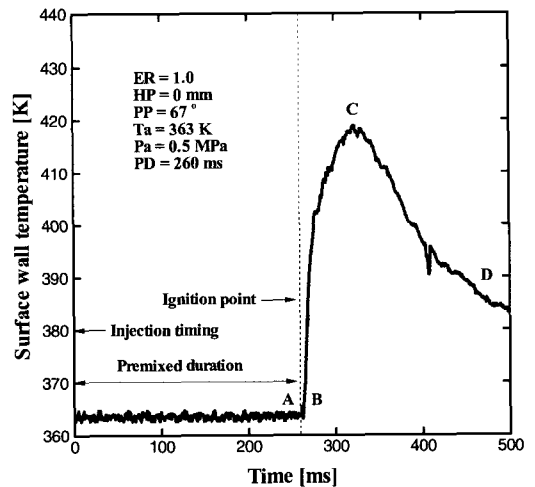


Fig. 6 Typical temperature signal at surface wall of constant volume combustion chamber.

3.2 연소실 벽면의 온도 변화

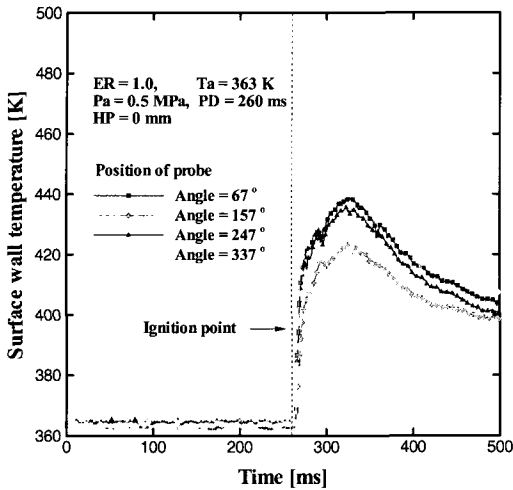


Fig. 7 Surface temperature of wall at ER=1.0 and HP=0 mm.

Fig. 7은 ER=1.0, HP=0 mm의 연소조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 순간온도의 시간분포를 나타낸 것이다. 최고순간온도는 PP=67°에서 438 K, PP=157°에서 423 K, PP=247°에서 435 K, PP=337°에서는 460 K으로 나타났다. 최고순간온도의 평균은 434 K이며, 가장 높은 최고순간온도를 나타낸 PP=337°에서와 가장 낮은 최고순간온도를 나타낸 PP=157°에서의 온도차는 19 K으로 나타났다. 압축공기의 온도를 353 K의 조건으로 연소시킨 연구결과와 비교해서 평균 5 K 정도 높은 순간온도를 나타냈지만 위치에 따른 순간온도의 분포는 거의 동일한 경향을 보였다. PP=67°는 PP=337°보다 스파크 플러그와 근접한 거리이지만 접지전극이 화염의 진행 방향을 방해하기⁹⁾ 때문에 PP=67°에서 보다는 PP=337°에서는 4 K만큼 높은 최고순간온도를 나타낸 것으로 판단된다.

Fig. 8은 희박 혼합비 ER=0.8, HP=0 mm의 연소조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 순간온도의 시간분포를 나타낸 것이다. 희박 혼합비 조건에서의 연소특성 특히, 계측위치에 따른 화염의 온도변화를 밝히기 위한 것이다. 최고순간온도는 PP=67°에서 419 K, PP=157°에서 411 K,

PP=247°에서 414 K, PP=337°에서는 420 K으로 나타났고, ER=1.0에서와 동일하게 PP=337°, 67°, 247°, 157°의 순으로 정성적인 경향을 보였다. 최고순간온도의 평균은 이론 혼합비 ER=1.0보다 18 K 감소한 416 K으로 나타났다. 가장 높은 최고순간온도를 나타낸 PP=337°에서와 가장 낮은 최고순간온도를 나타낸 PP=157°에서의 온도차는 9 K으로 이론 혼합비 ER=1.0과 비교하여 근소한 값이다. 이러한 경향은 연소 가능한계까지 혼합비가 희박해질수록 작게 나타났다. 압축공기의 온도를 353 K의 조건으로 연소시킨 연구결과와 비교해서 평균 5 K정도 높은 순간온도를 나타냈다. 화염온도의 시간변화 특성으로는 화염이 연소실 전면으로 전파된 후 PP=337°에 위치한 프로브에서의 온도가 시종 가장 높은 값을 보이고, PP=157°조건에서 가장 낮은 값을 보였다.

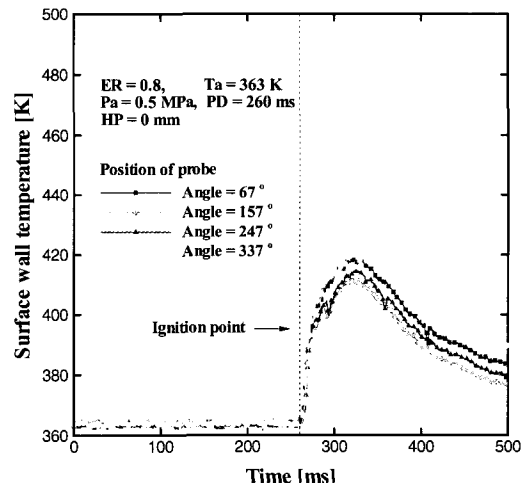


Fig. 8 Surface temperature of wall at ER=0.8 and HP=0 mm.

Fig. 9는 농후 혼합비 ER=1.2, HP=0 mm의 연소조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 순간온도의 시간분포를 나타낸 것이다. 최고순간온도는 PP=67°에서 468 K, PP=157°에서 451 K, PP=247°에서 464 K, PP=337°에서는 495 K으로 나타났고, ER=1.0과 ER=0.8에서와 동일하게 PP=337°, 67°, 247°, 157°의 순으로 정성적인 경향을 보였다. 압축공기의 온도를 353 K의 조

건으로 연소시킨 연구결과와 비교해서 평균 5 K 정도 높은 순간온도를 나타냈으며, ER=1.0 및 ER=0.8의 결과와 유사한 결과를 보였다. 최고순간온도의 평균은 이론 혼합비 ER=1.0보다 36 K 증가하였고, 희박 혼합비 ER=0.8보다는 50 K 증가한 470 K으로 나타났다. 가장 높은 최고순간온도를 나타낸 PP=337°와 가장 낮은 최고순간온도를 나타낸 PP=157°와의 온도차는 44 K으로 프로브 위치에 따른 최고순간온도 변화폭은 크게 차이가 났다. 이러한 현상은 혼합비가 농후할수록 현저하게 나타났고, 프로브 위치에 따른 온도차도 크게 차이가 났다. 이는 절대온도의 값이 타 당량비에 비해 상대적으로 높기 때문에 화염의 이동에 따른 열손실도 그만큼 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

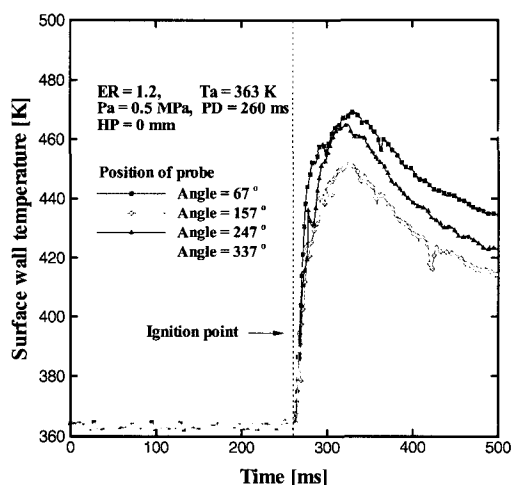


Fig. 9 Surface temperature of wall at ER=1.2 and HP=0 mm.

Fig. 10은 HP=0 mm, PP=337°에서 희박 혼합비 ER=0.8, 이론 혼합비 ER=1.0 및 농후 혼합비 ER=1.2의 연소조건으로 화염이 측정부를 통과할 때의 순간온도의 시간분포를 나타낸 것이다. 본 그림은 당량비 증가에 따른 화염온도의 시간경과를 비교하기 위한 것으로 최고순간온도는 ER=0.8에서 420 K, ER=1.0에서 442 K, ER=1.2에서는 495 K으로 나타났다. 이론 혼합비 ER=1.0을 기준으로 해서 ER=1.2에서 53 K

증가하였고, ER=0.8에서는 22 K 감소하였다. 이것을 백분율로 나타내면 이론 혼합비 ER 1.0을 기준으로 해서 최고순간온도는 ER 1.2에서 12% 증가하였고, ER 0.8에서는 5% 감소하여 나타났다.

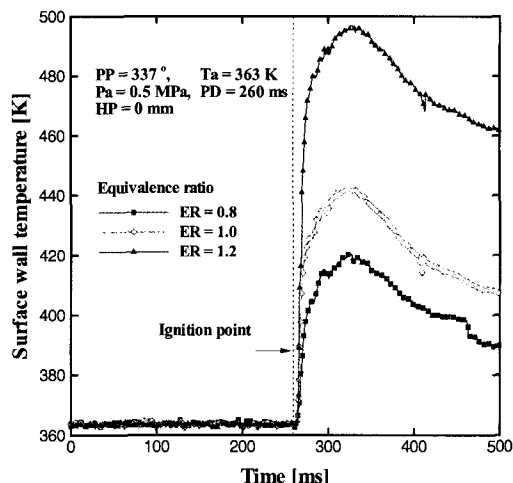


Fig. 10 Surface temperature of wall at PP=337° and HP=0 mm.

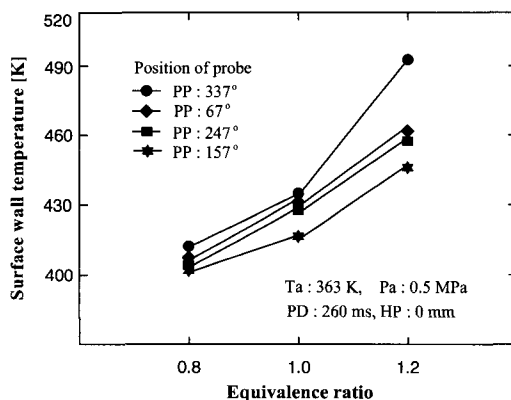


Fig. 11 Surface temperature of wall at equivalence ratio and probe position.

Fig. 11은 4곳의 온도측정점과 HP=0 mm에서 주어진 당량비 조건으로 화염이 측정부를 통과할 때의 최고순간온도를 계측하여 비교한 것이다. 가장 높은 순간온도는 ER=1.2, PP=337°이었으며, 당량비 증가에 따른 공급열량의 증가에 의해 연소실 벽면의 순간온도는 정성적으로 증가하지만

ER=1.2, PP=337°의 경우 예측할 수 있는 온도보다도 더 높은 결과의 순간온도를 나타냈다. 이는 강력한 화염이 형성되는 연소중기에 화염면이 계측부를 통과하기 때문으로 판단된다.

3.3 연소실 벽면의 열유속 변화

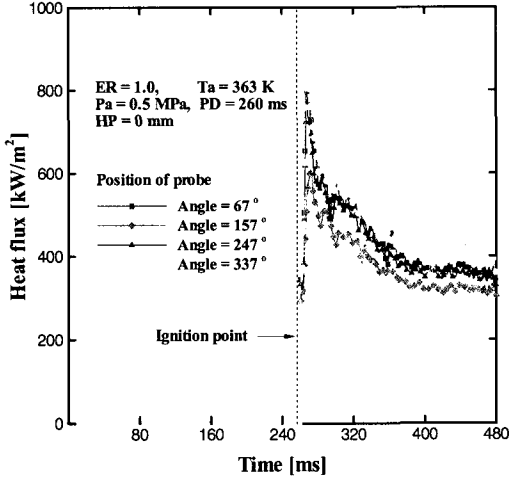


Fig. 12 Unsteady heat flux of wall at ER=1.0 and HP=0 mm.

Fig. 12는 이론 혼합비 ER=1.0, HP=0 mm의 연소조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 화염 온도를 이용해서 비정상 순간 열유속을 나타냈다. 점화가 이루어지면 순간온도는 급격히 상승하면서 연소실 벽면으로의 손실 열량이 빠져나가고 있다. ER=1.0, HP=0 mm의 연소조건에서 연소시켰을 때 260~480 ms동안 벽면으로의 열손실을 의미하는 총열량(전 연소기간의 적산치)은 PP=67°에서 97,867 kJ/m², PP=157°에서 83,339 kJ/m², PP=247°에서 94,006 kJ/m², PP=337°에서 102,904 kJ/m²으로 연소실 벽면의 열부하의 상태를 알 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 점화 플러그와 근접한 거리이지만 점지전극이 화염의 진행 방향을 방해하기 때문에 PP=67°에서 보다 PP=337°에서 총열량이 5,037 kJ/m²의 큰 값으로 차이났다.

Fig. 13은 HP=0 mm, PP=337°에서 각 당량비 조건으로 화염이 측정부를 통과할 때의 화염온

도를 이용해서 산출한 비정상 순간열유속을 나타냈다. 당량비 증가에 따른 연소실 벽면으로 유출되는 손실 총열량은 ER=0.8에서 77,967 kJ/m², ER=1.0에서 102,904 kJ/m², ER=1.2에서는 174,909 kJ/m²으로 나타났다. 이론 혼합비 ER=1.0을 기준으로 해서 ER=1.2에서 72,005 kJ/m² 증가하고, 희박 혼합비 ER=0.8에서는 24,937 kJ/m² 감소하였다. 즉, 이론 혼합비 ER 1.0을 기준으로 해서 ER 1.2에서 170% 증가하였고, ER 0.8에서는 24% 감소하므로 연소실 벽면에서의 손실 총열량은 당량비에 의하여 큰 영향을 받는다. 또한 화염온도가 높아지는 ER=1.2의 농후한 혼합비 조건에서 손실 총열량이 높아지는 것을 알 수 있다. 이는 농후 혼합비 조건일수록 냉각 손실은 증가함을 의미한다.

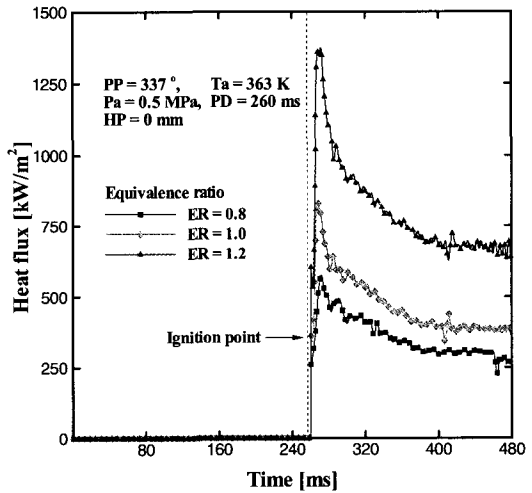


Fig. 13 Unsteady heat flux of wall at PP=337° and HP=0 mm.

Fig. 14는 4곳의 온도측정점과 HP=0 mm, 주어진 혼합비 조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 화염온도로부터 비정상 순간열유속을 합산하여 손실 총열량 증가비율로서 나타났다. 당량비 증가에 따라 손실 총열량은 거의 직선적으로 증가하였다. 특히, 농후 혼합비 ER=1.2, PP=337°에서 높은 손실 총열량을 보였다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 당량비 증가에 따른 강력한 초기화염

덩어리가 측정부 근방에서 연소를 행하기 때문에 그 만큼 벽면으로 유출되는 손실 총열량도 급격히 증가한 것으로 판단된다. 평균 열손실 증가비율은 이론 혼합비 ER=1.0을 기준으로 해서 ER=1.2에서 26% 증가하였고, ER=0.8에서는 14% 감소하여 나타났다. 따라서, 연소실 벽면으로의 열손실을 의미하는 전 연소기간동안 손실 총열량은 당량비에 큰 영향을 받으며, 화염전과 끝부분으로 갈수록 감소함을 알 수 있었다.

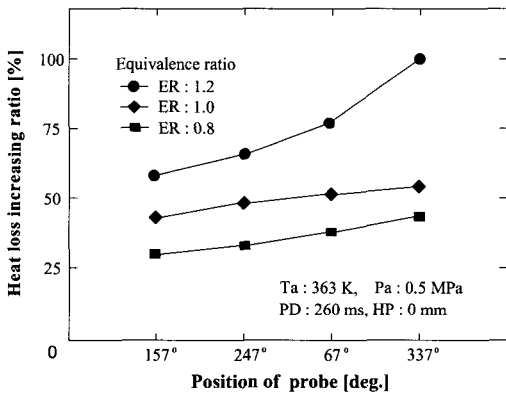


Fig. 14 Heat loss increasing ratio at equivalence ratio and probe position.

4. 결 론

정적연소기내에서 비정상 열부하를 해석하기 위하여 박막형 순간온도 프로브를 제작하고, 당량비 및 박막형 순간온도 프로브의 장착 위치에 따라 연소실 벽면에서의 순간온도 및 순간열유속에 미치는 영향에 대해 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PP=67°에서 438 K, PP=157°에서 423 K, PP=247°에서 435 K, PP=337°에서는 460 K으로 나타났다. 최고순간온도의 평균은 434 K으로 압축공기의 온도를 353 K의 조건으로 연소시킨 연구결과와 비교해서 평균 5 K정도 높은 순간온도를 보였지만 위치에 따른 순간온도의 분포는 거의 동일한 경향으로 나타났다.
- 2) 이론 혼합비 ER=1.0을 기준으로 해서 ER=1.2

에서 170% 증가하였고, ER=0.8에서는 24% 감소하므로 연소실 벽면에서의 손실 총열량은 당량비에 의하여 큰 영향을 받는다. 또한 화염 온도가 높아지는 ER=1.2의 농후한 혼합비 조건에서 손실 총열량이 높아지는 것을 알 수 있다. 이는 농후 혼합비 조건일수록 냉각손실은 증가함을 의미한다.

- 3) 평균 열손실 증가비율은 이론 혼합비 ER=1.0을 기준으로 해서 ER=1.2에서 26% 증가하였고, ER=0.8에서는 14% 감소하여 나타났다. 따라서, 연소실 벽면으로의 열손실을 의미하는 계측 연소기간동안 손실 총열량은 당량비에 큰 영향을 받으며, 화염전과 끝부분으로 갈수록 감소함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Enomoto Y., Furuhashi, "Study on Thin Film Thermocouple for Measuring Instantaneous Temperature on Surface of Combustion Chamber Wall in a Internal Combustion Engine", Bulletin of JSME, Vol.28, No.235, pp.8~116, 1985.
- [2] Eichelberg, "自動車用ガソリン機関の實用時におけるピストン温度", 日本機械學會, 39卷, 317号, pp.324~337, 1974.
- [3] C. Arocoumanis and C. S. bae, Visualization of Flow/Flame Interaction in a Constant Volume Combustion Chamber", SAE No.930868, 1993.
- [4] 多田, "Temperature Measurement in Rotor Bearing of Rotary Engine", Bulletin of the JSAE, No.7, pp.11~12, 1976.
- [5] 하종률 외 3인, "회색연소를 위한 혼합기의 성층급기와 유동에 관한 연구", KSME, 제8권 1호, pp.1~9, 2000.
- [6] 이치우 외 3인, "정적연소기에서 순간온도를 이용한 열유속에 관한 연구", KSAE, 제9권 제4호, pp.103~111, 2001.

- [7] 김시범, 이치우, “4사이클 DOHC 엔진의 실린더 헤드에서 냉각손실을 고려한 열해석”, 삼성자동차 산학협동연구과제, 1998.
- [8] 榎本 良輝 “自動車エンジンの溫度測定および熱損失に関する研究”, 武蔵工業大學部機械工學科 學位論文.
- [9] 하중률 외 4인, “IDI형 정적연소기에서 점화시기 및 연락공형상이 연소특성에 미치는 영향”, KSME, Vol.4, No.3, No. 96370066, pp.220~231, 1996.

저 자 소 개



이치우 (李致雨)

1965년 8월생, 1991년 동아대학교 기계공학과 졸업, 1993년 동대학원 기계공학과 졸업(석사), 2000년 동대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1995~현재 마산대학교 기계자동차공학부 교수, 당학회 회원