

연소실 초기온도 변화에 따른 순간열유속에 관한 연구 A Study of Heat Flux and Instantaneous Temperature According to the Initial Temperature of Combustion Chamber in a Constant Volume Combustion Chamber

이치우*
Chi-Woo Lee

<Abstract>

In the production of internal combustion engines, there has been a move towards the development of high performance engines with improved fuel efficiency, lighter weight and smaller sizes. These trends help to answer problems in engines 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. In order to thoroughly understand the characteristics of combustion, the authors measured the wall temperature of the combustion chamber and computed heat flux through a cylinder wall while varying the protrusion height of the probe. For achieving the above goals, a instantaneous temperature probe was developed, thereby making possible the analysis of the instantaneous temperature of wall surface and the detection of unsteady heat flux in the constant volume combustion chamber.

Key words : Instantaneous temperature probe, Constant volume combustion chamber, Gold thin film

1. 서론

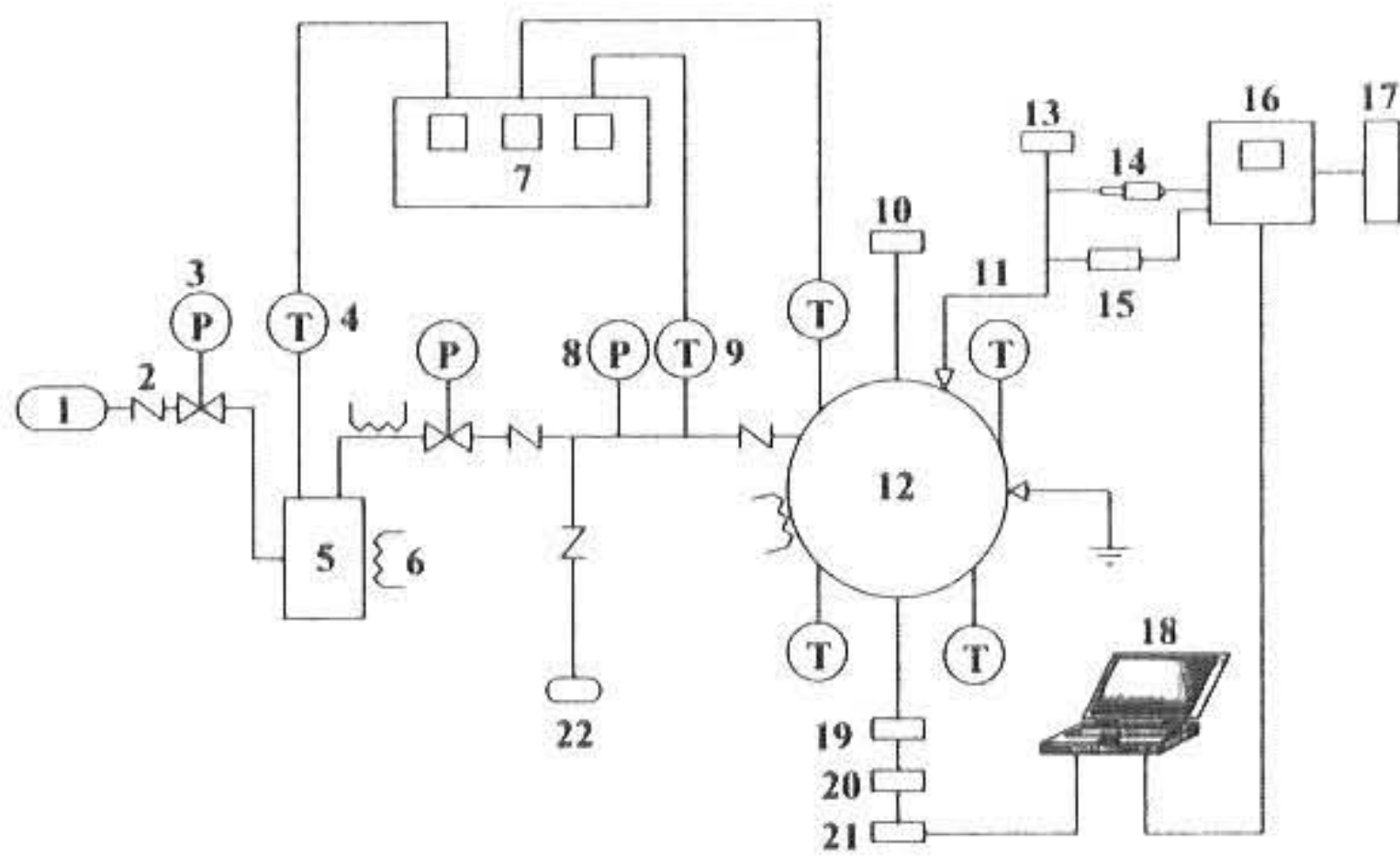
최근 자동차 내연기관에 대하여서는 엄격해지는 배출가스 규제 및 연비 등에 따른 환경친화적인 기술개발에 심혈을 기울이고 있다. 더불어 고출력을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 고출력으로 인한 공급열량의 증가는 출

력이 증대하는 반면 열부하도 같이 증가하므로 그에 따른 연소실 내부와 구성품들에 대하여 열적 거동이 반영된 최적의 설계가 되어야 한다. 연소시 발생하는 가스온도의 변화에 의해 비정상적으로 변화하는 연소실 벽면의 순간온도는 응답성이 빠른 순간온도 프로브 (instantaneous surface temperature probe)¹⁾를 이

* 마산대학 기계자동차공학부, 공학박사
cwlee@masan.ac.kr, 011-848-5315

용하여 측정할 수 있다. 연소실내 연소가스로부터 연소실 벽면으로의 열 손실 상태를 명확하게 규명하는 것은 내연기관의 열부하 대책 및 열손실 저감을 통한 열효율 향상을 위해 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 정적연소기(constant volume combustion chamber)내에서 박막형 순간온도 프로브의 측정위치 및 주어진 초기 연소온도 조건에서 혼합기를 연소시킬 때의 경과시간에 따라 연소실 내벽면의 순간온도를 측정한다. 이 결과를 이용하여 제 조건에 따른 연소특성의 해석, 연소실 벽면에서의 최고 순간온도, 화염의 이동특성에 따른 순간온도의 분포 및 비정상 순간열유속 등을 산출하여 연소실 벽면으로 유출되는 손실 총열량을 비교하고자 한다.



- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| 1. Air compressor | 2. Check valve |
| 3. Pressure gauge | 4. Thermo - couple |
| 5. Surge tank | 6. Heater |
| 7. Temperature controller | 8. Pressure gauge |
| 9. Air inlet / exhaust | 10. Turbulence generator |
| 11. Ignition plug | 12. Combustion chamber |
| 13. Ignition device | 14. High voltage probe |
| 15. High current probe | 16. Oscilloscope |
| 17. X - Y plotter | 18. Computer |
| 19. Pressure transducer | 20. Amplifier |
| 21. A / D converter | 22. Vacuum pump |

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

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.

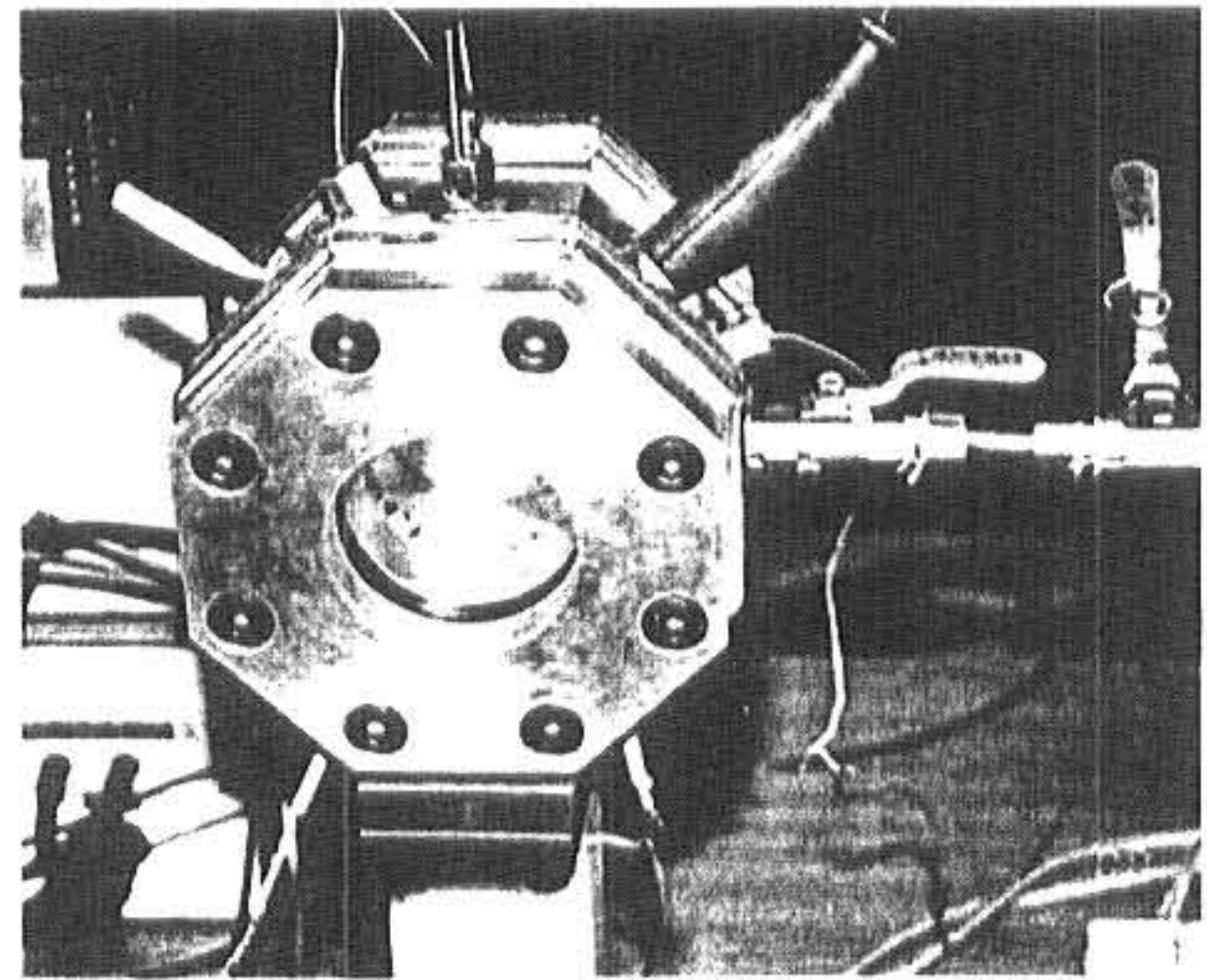


Fig. 2 Photographs of constant volume combustion chamber

Fig. 2는 정적연소기 실험장치의 사진이다. 정적연소기는 정확한 연소 초기온도를 유지하기 위하여 단열소재를 사용하여 고정하였다.

Fig. 3은 압력계, 순간온도 프로브 등을 장착한 정적연소기이다. 이 때 순간온도 프로브는 압력계를 기준으로 PP=67°, 157°, 247°, 337°의 방사형으로 설치⁴⁾하였다.

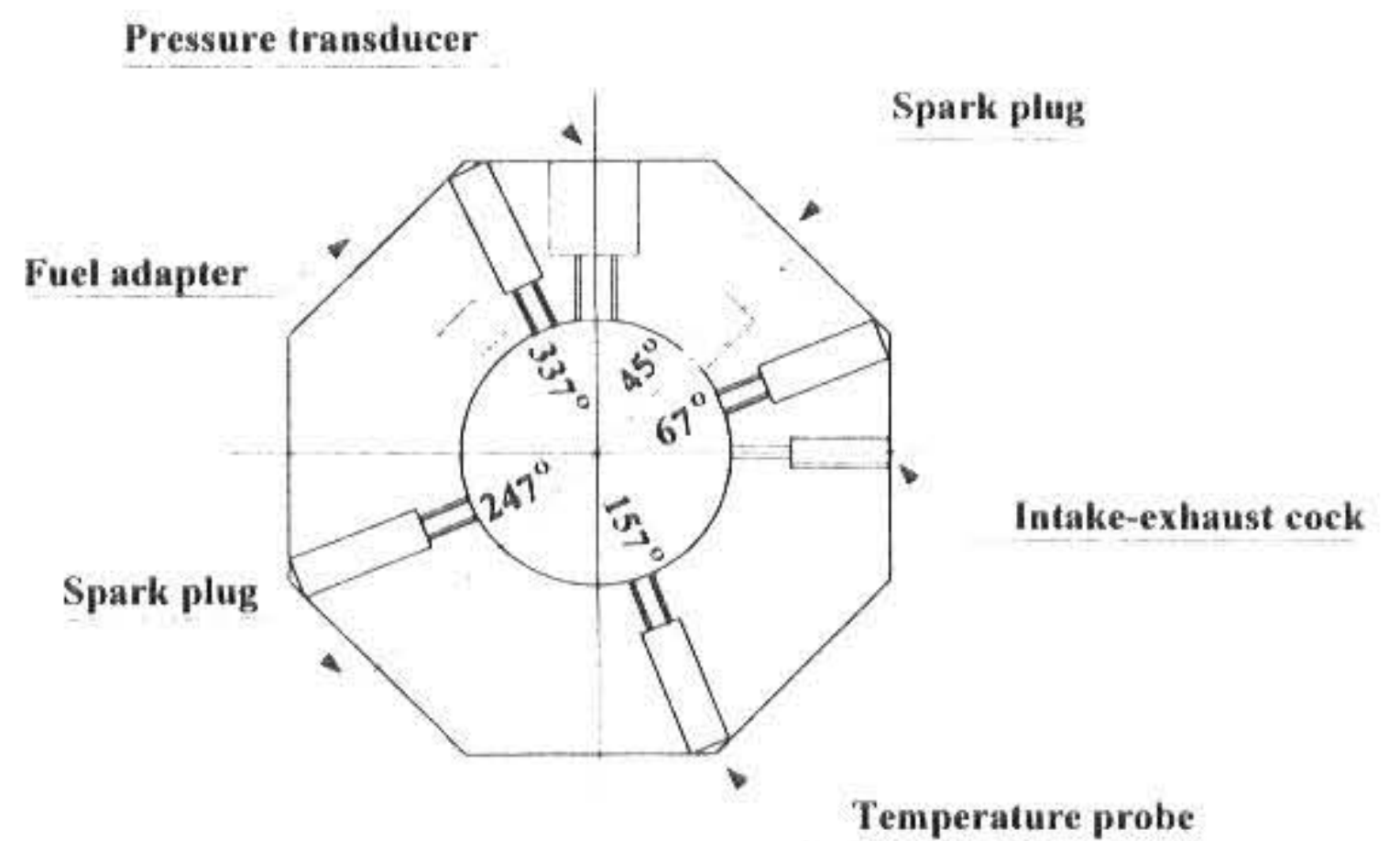


Fig. 3 Schematic diagram of constant volume combustion chamber

Fig. 4는 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 기전력으로부터 온도환산계수를 결정하고자 하였다. 동일한 방법으로 모든 순간온도 프로브에 대하여 검정을 실시한 기전력에 대한 온도환산계수는 각각 26.6 K/mV였다.

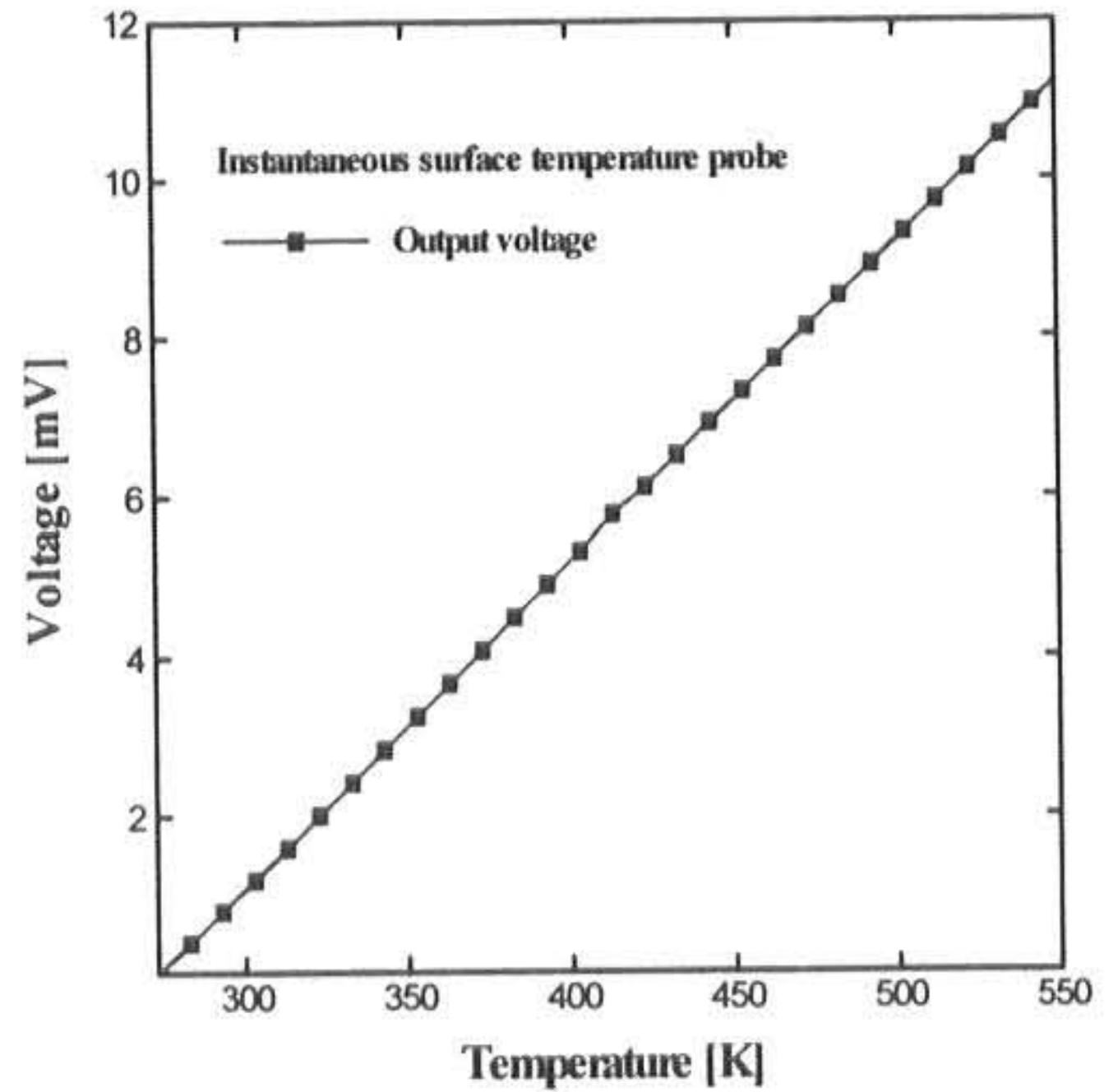


Fig. 4 Calibration chart of temperature probe

Fig. 5는 본 연구에서 사용한 순간온도 프로브이다. 순간온도 프로브는 Seebeck 효과를 응용한 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 산화성 분위기에 견딜 수 있도록 1~2 μm 두께의 무전해 니켈도금으로써 내구성을 향상시키고자 하였다. 순간온도 프로브의 모재는 정적연소기와 동일한 재료로서 Al6063을 φ3.0×40 mm로 제작하였고, 열전대는 φ0.3 mm의 K-type을 사용하였다. 모재의 축방향으로 φ0.5×40 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.

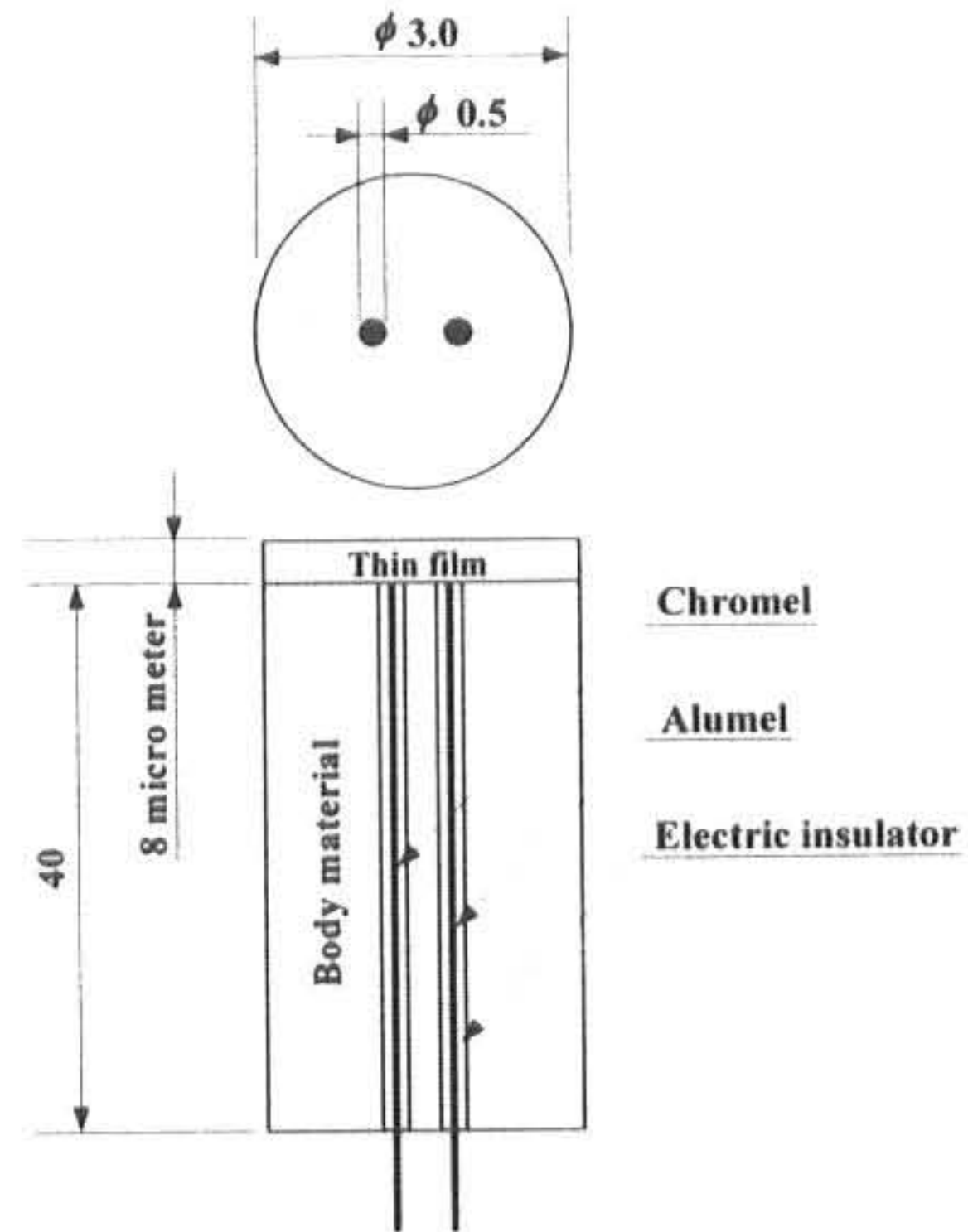


Fig. 5 Schematic of the instantaneous temperature probe used K-type thermocouple

Fig. 6은 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.

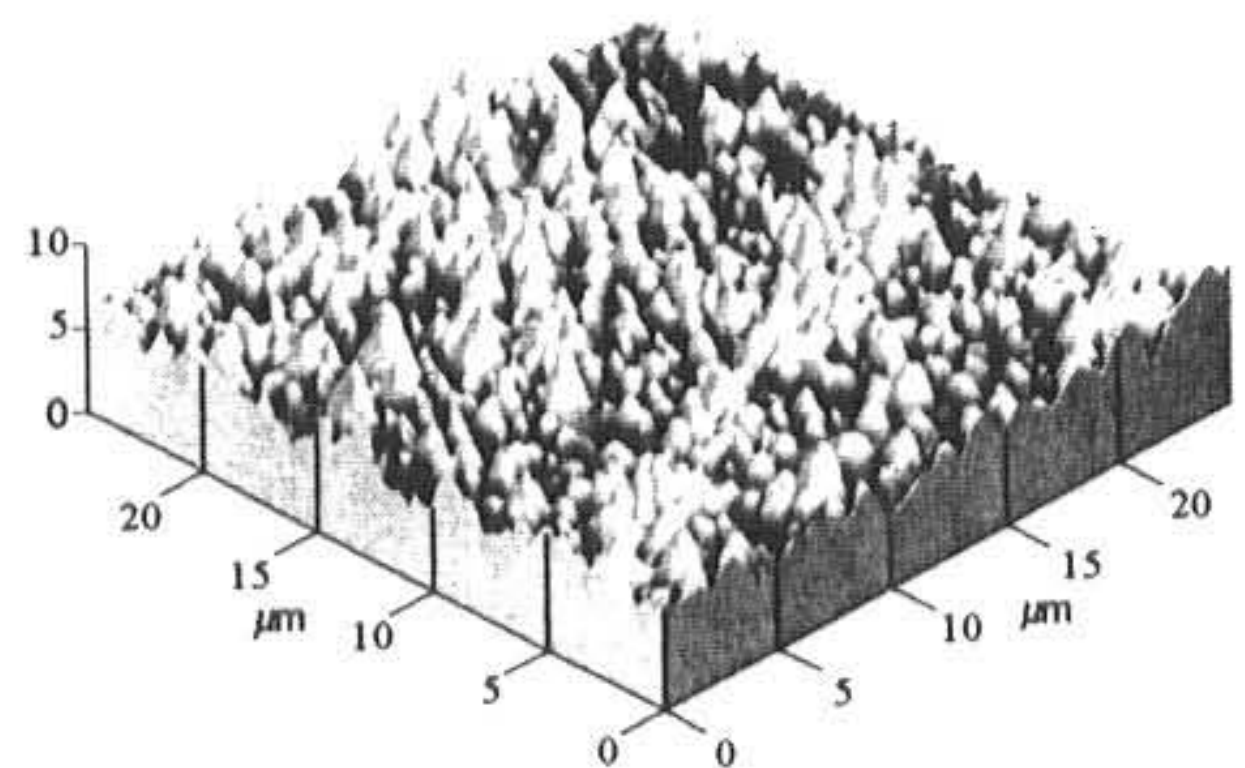


Fig. 6 Photograph showing the measured thickness of the junction

2.2 실험방법

탈습된 공기를 압축기를 이용하여 0.5 MPa의 압력으로 정적연소기의 연소실에 주입시키고, 주어진 연소실의 초기온도를 343 K, 353 K, 363 K 상태에서 이론 공연비만큼의 가솔린

을 분사 시작으로부터 260 ms 후에 점화장치에 의해 점화되도록 하였다. 연소압력 및 연소실 벽면의 순간온도는 정적연소기에 설치된 압력변환기와 순간온도 프로브에 의해서 측정된다.

Table 1은 실험의 초기조건⁴⁾을 나타내고, Table 2는 연료분사 후 점화시기까지의 실험조건⁵⁾을 나타내며, 모든 계측 및 제어를 위해 P/C를 사용하였다. 본 실험에서는 동일한 실험조건에서 선행한 순간온도 프로브의 돌출높이에 따른 연구결과⁶⁾와 비교하고자 하였다.

Table 1 Initial conditions of experiment.

Parameters	Conditions
Equivalence ratio	1.0
Height of probe	0 mm
Premixed duration	260 ms
Ignition pressure	0.5 MPa
Fuel	Gasoline
Ignition method	CDI

Table 2 Experimental conditions.

Parameters	Conditions
Position of probe	67°, 157°, 247°, 337°
Initial temperature of combustion chamber	343 K, 353 K, 363 K

당량비(equivalence ratio) ER=1.0, 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 연소실 초기온도(initial temperature of combustion chamber) IT= 343 K, 353 K, 363 K의 조건으로 실험을 행하였다.

3. 연소실 벽면의 열유속 계산

열유속 계산을 위해 연소실 벽면에서의 열전달을 1차원 비정상 열전도로 가정하면 다음과 같은 1차원 비정상 열전도방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서, x 는 내벽면으로부터 두께방향으로 거리, α 는 벽재질의 열확산계수이다. 위 식의 해는 다음과 같다.

$$T(x, t) = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} e^{-x\sqrt{n\omega/2\alpha}} \cdot [A_n \cos(n\omega t - x\sqrt{n\omega/2\alpha}) + B_n \sin(n\omega t - x\sqrt{n\omega/2\alpha})] \quad (2)$$

내벽면($x=0$)에서의 온도 $T(0, t)$ 는

$$T(0, t) = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)] \quad (3)$$

으로 된다. 좌변의 $T(0, t)$ 는 실험으로 측정된 값이므로 우변에서의 T_0, A_n, B_n 은 이를 Fourier 급수로 전개할 때의 계수로서 실험시간 간격이 2τ 일 때 아래와 같다.

$$T_0 = \frac{1}{2\tau} \int_0^{2\tau} T(0, t) dt$$

$$A_n = \frac{1}{\tau} \int_0^{2\tau} T(0, t) \cos(n\omega t) dt$$

$$B_n = \frac{1}{\tau} \int_0^{2\tau} T(0, t) \sin(n\omega t) dt$$

따라서, 내벽면에서 열유속 $q_w(t)$ 는

$$q_w(t) = -k \left[\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right]_{x=0}$$

$$= \frac{k}{L} (T_0 - T_m) + k \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{n\omega/2\alpha} \cdot [C_n \cos(n\omega t) + D_n \sin(n\omega t)] \quad (4)$$

여기서, $C_n = A_n + B_n$, $D_n = B_n - A_n$, T_m 은 냉접점온도, L 은 벽면 두께 그리고 k 는 열전도율이다. $T(0, t)$ 데이터를 Fourier

급수로 전개하는 데 있어 Gibbs 현상을 벗어난 구간에서 Fourier 급수 전개에 의한 평균오차는 $1 \times 10^{-5} \%$, 최대오차는 4.7% 이내였다⁷⁾.

4. 실험결과 및 검토

4.1 순간온도 특성

Fig. 7은 순간온도 프로브의 장착위치(PP) 및 연소실 초기온도(IT)의 주어진 연소 조건에서 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 A점에서 D점까지의 연소에 의한 순간온도의 분포, 연료분사개시부터 점화시기까지를 PD로 구분할 수 있다. A점에서 C점까지의 순간온도 분포로부터 본 연구에서 사용한 순간온도 프로브 응답특성의 재현성 및 고응답성을 확립하였다.

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. 이 때 금 박막의 두께는 선행된 연구결과⁸⁾를 참고하였다.

4.2 연소실 벽면의 온도 변화

Fig. 8은 ER=1.0, IT=343 K의 연소조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 순간온도의 시간분포를 나타낸 것이다.

최고순간온도는 PP=67°에서 431 K, PP=157°에서 416 K, PP=247°에서 427 K, PP=337°에서는 435 K으로 나타났다. 최고순간온도의 평균은 427 K이며, 가장 높은 최고순간온도를 나타낸 PP=337°에서와 가장 낮은 최고순간온도를 나타낸 PP=157°에서의 온도차는 19 K으로 나타났다.

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.

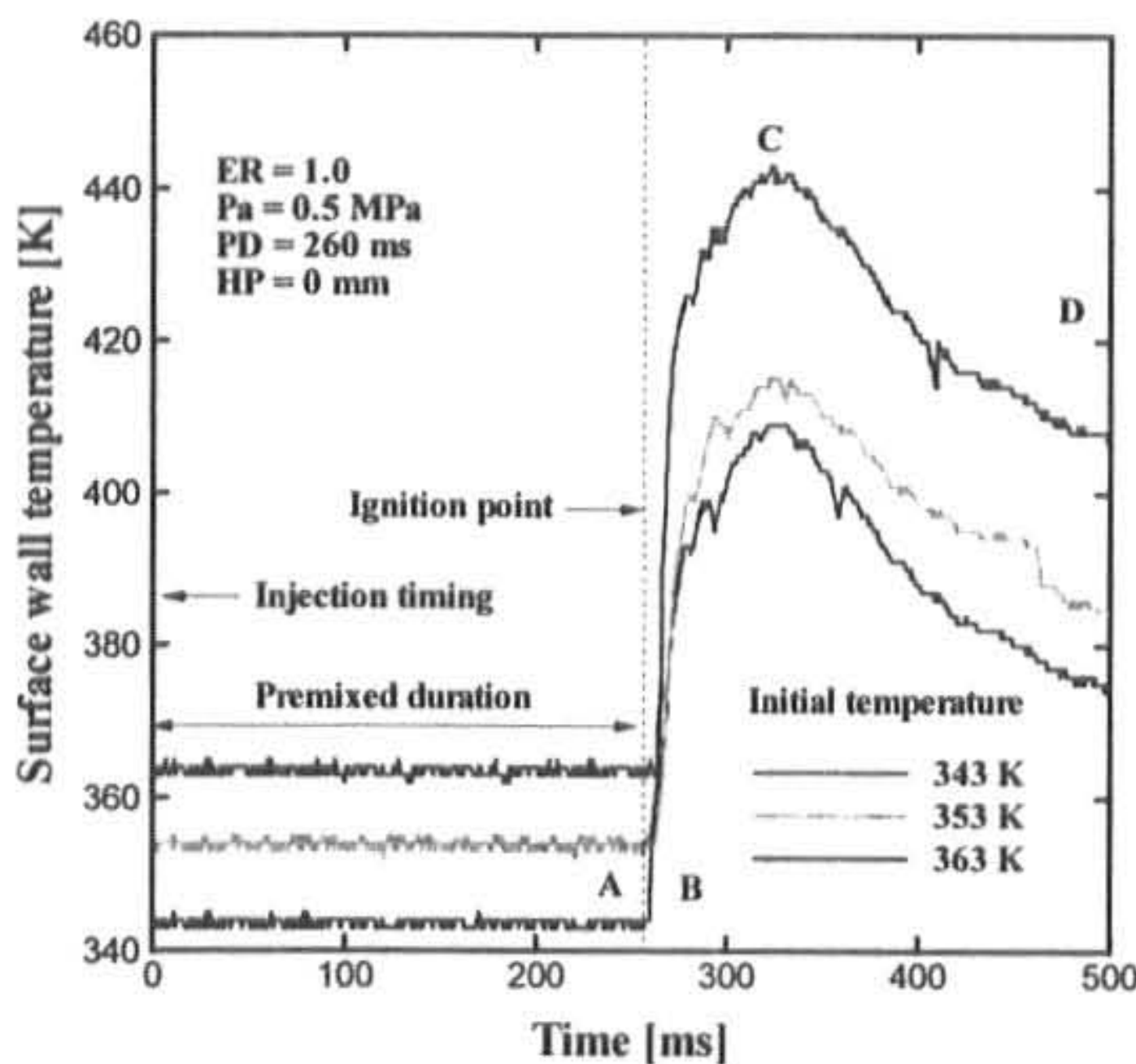


Fig. 7 Typical temperature signal at surface wall of constant volume combustion chamber

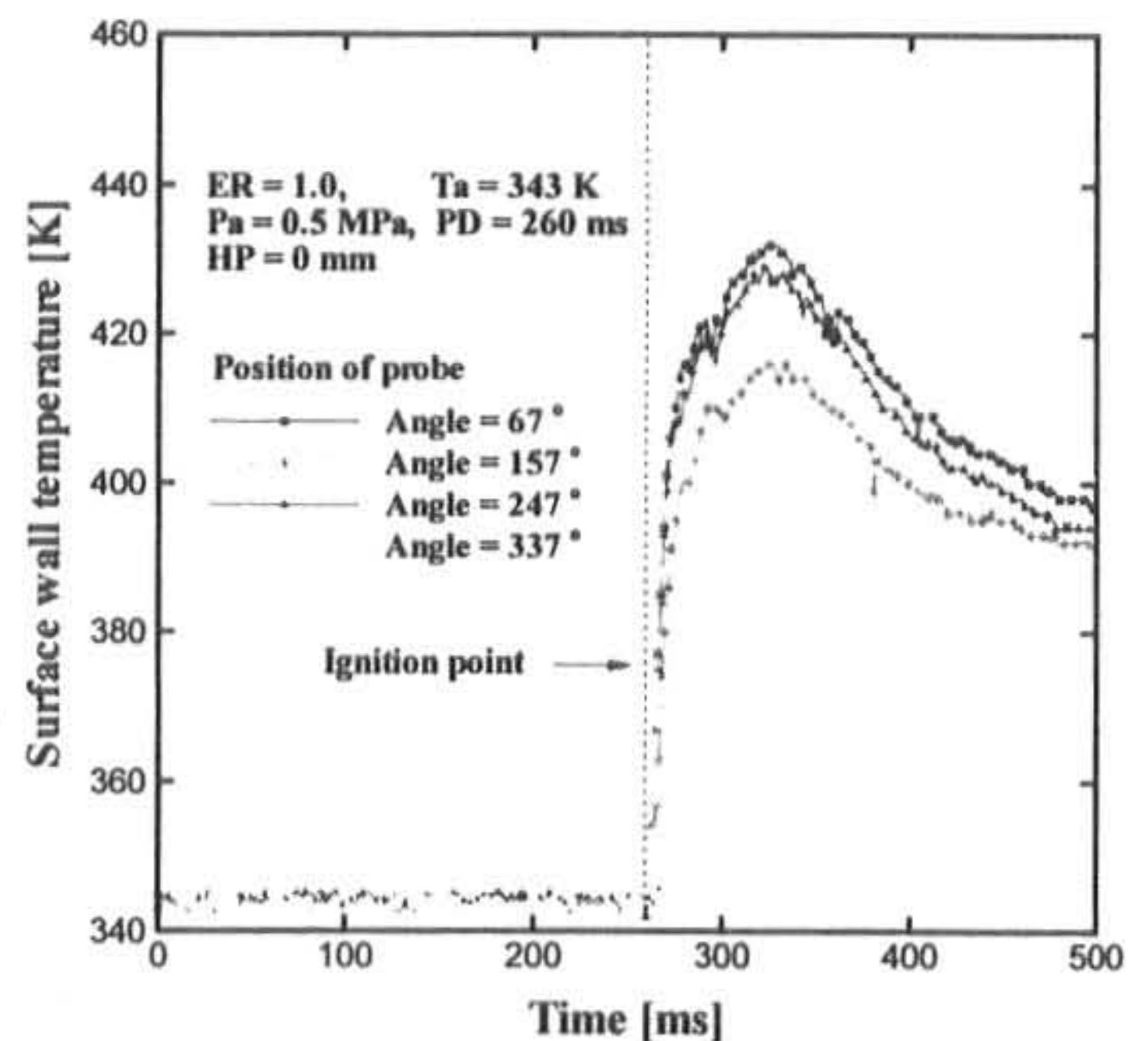


Fig. 8 Surface temperature of wall at ER=1.0 and IT=343 K

Fig. 9는 ER=1.0, IT=353 K의 연소조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 순간온도의 시간분포를 나타낸 것이다. 최고순간온도는 PP=67°에서 433 K, PP=157°에서 418 K, PP=247°에서 429 K, PP=337°에서는 437 K으로 나타났다. 최고순간온도의 평균은 429 K이며, 가장 높은 최고순간온도를 나타낸 PP=337°에서와 가장 낮은 최고순간온도를 나타낸 PP=157°에서의 온도차는 19 K으로 나타났다. IT=343 K의 조건으로 연소시킨 연구결과와 비교해서 평균 2 K정도 높은 429 K으로 나타났지만 위치에 따른 순간온도의 분포는 동일한 경향을 보였다.

Fig. 10은 ER=1.0, IT=363 K의 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 442 K으로 나타났다. 최고순간온도의 평균은 434 K이며, 가장 높은 최고순간온도를 나타낸 PP=337°에서와 가장 낮은 최고순간온도를 나타낸 PP=157°에서의 온도차는 19 K으로 나타났다. IT=353 K의 조건으로 연소시킨 연구결과와 비교해서 평균 5 K정도 높은 순간온도를 나타냈고, 343 K의 조건에서는 평균 7 K정도 높은 493 K으로 나타났다.

Fig. 11은 ER=1.0, PP=337°, 주어진 연소실 초기온도(IT)의 조건에서 연소시킬 때 화염이 측정부를 통과할 때의 최고순간온도를 비교하여

나타낸 것이다. IT=343 K에서 최고순간온도는 427 K이며, IT=353 K에서 IT=343 K보다도 2 K 높은 429 K이고, IT=363 K에서는 IT=343 K보다는 7 K 높고, IT=353 K보다는 5 K 높은 434 K으로 나타났다. 이는 IT=343 K에서 IT=363 K 동안의 최고순간온도 변화폭은 IT=343 K에서 IT=353 K에 비해 71% 증가한 것으로 연소실 초기온도에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig.12는 ER=1.0, IT=343 K, 353 K, 363 K의 연소 조건에서 화염이 측정부를 통과할 때 최고순간온도를 계측하여 비교한 것이다. 가장 높은 순간온도는 IT=363 K, PP=337°이었으며, 연소실 초기온도 증가에 따른 공급열량의 증가에 의해 연소실 벽면의 순간온도가 정성적으로 증가하였다.

4.3 연소실 벽면의 열유속 변화

Fig. 13은 이론 혼합비 ER=1.0, IT=343 K의 연소조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 화염온도를 이용해서 비정상 순간 열유속을 나타냈다. 점화가 이루어지면 순간온도는 급격히 상승하면서 연소실 벽면으로의 손실 열량이 빠져나가고 있다. 순간열유속은 측정위치에 따라 차이가 있지만 순간온도와 유사한 형태로 나타났다. ER=1.0, IT=343 K의 연소조건에서 연소시켰을 때 260~480 ms동안 벽면으로의 열손실을 의미하는 총열량(전 연소기간의 적산치)은 PP=67°에서 143,123 kJ/m²,

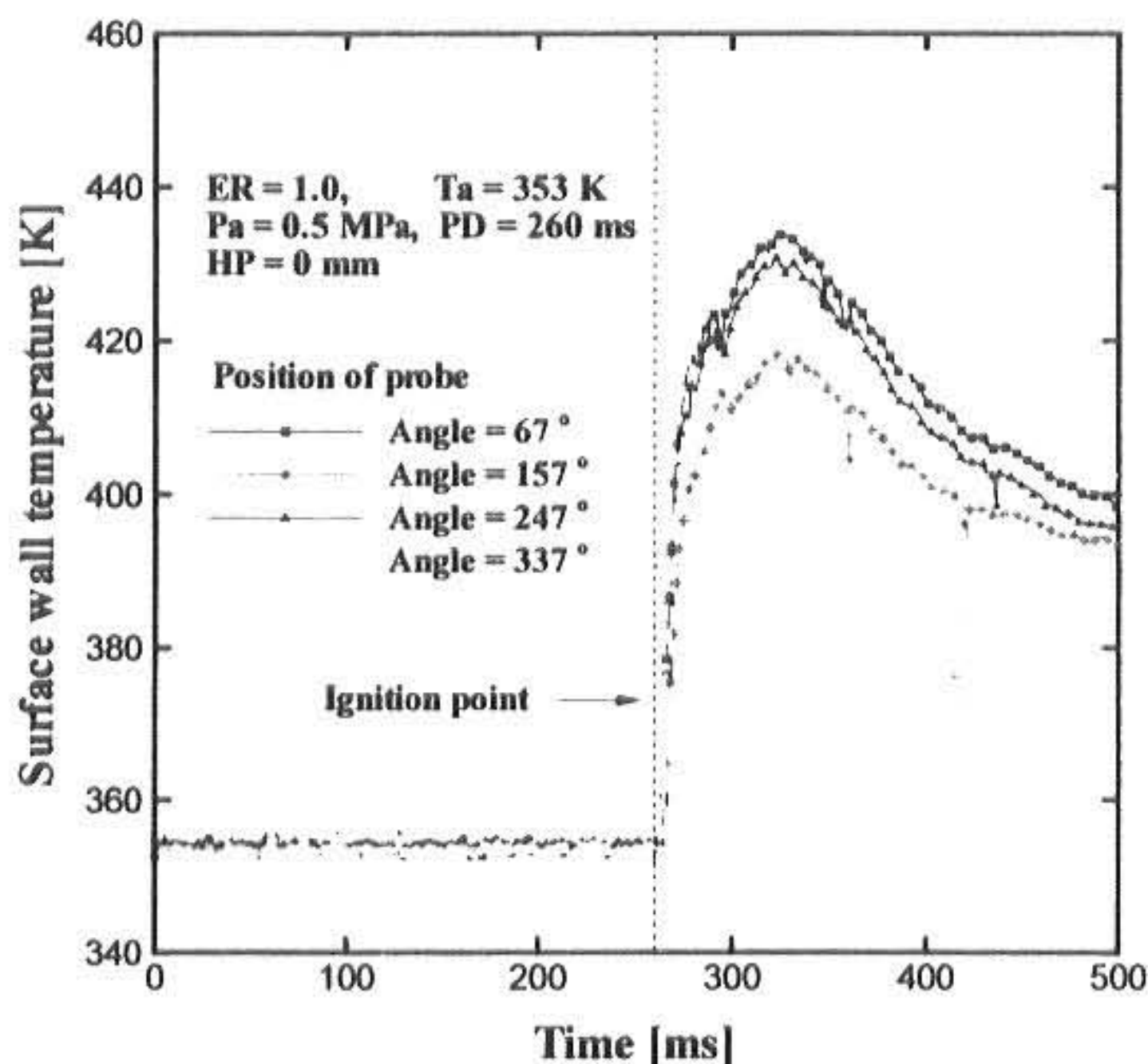


Fig. 9 Surface temperature of wall at ER=1.0 and IT=353 K

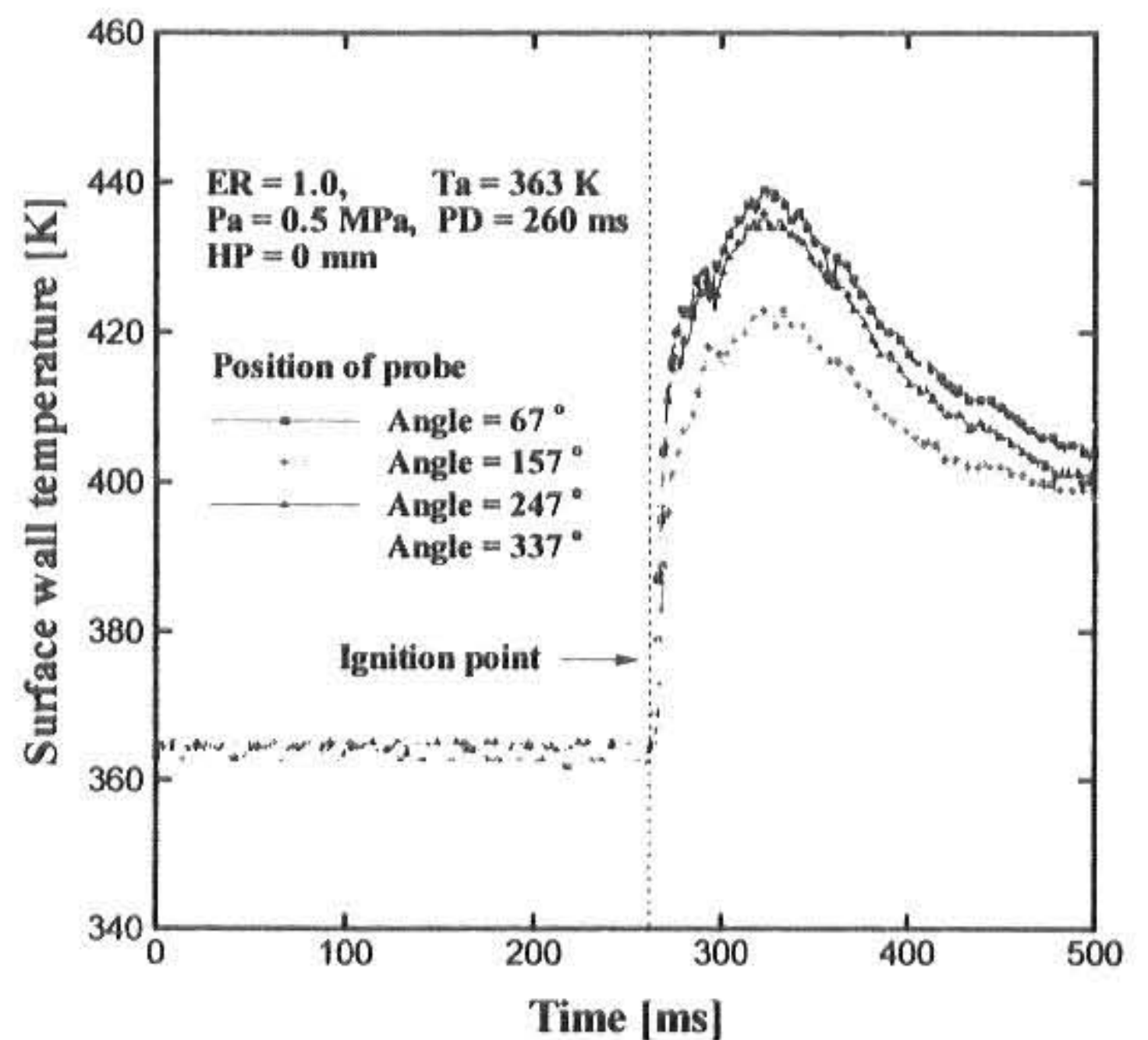


Fig. 10 Surface temperature of wall at ER=1.0 and IT=363 K

PP=157°에서 114,009 kJ/m², PP=247°에서 135,283 kJ/m², PP=337°에서 153,083 kJ/m²으로 연소실 벽면의 열부하의 상태를 알 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 점화 플러그와 근접한 거리이지만 접지전극이 화염의 진행 방향을 방해하기 때문에 PP=67°에서 보다는 PP=337°에서 총열량이 9,960 kJ/m²의 큰 값으로 차이났다.

Fig. 14는 ER=1.0, PP=337°에서 연소실 초기 온도 조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 화염온도를 이용해서 산출한 비정상 순간열유속을 나타냈다. 연소실 초기 온도 변화에 따른 연소실 벽면으로 유출되는 손실 총열량은 IT=343 K에서 76,519 kJ/m², IT=353 K에서 87,609 kJ/m², IT=363 K에서는 102,904 kJ/m²으로 나타났다. IT=353 K을 기준으로 해서

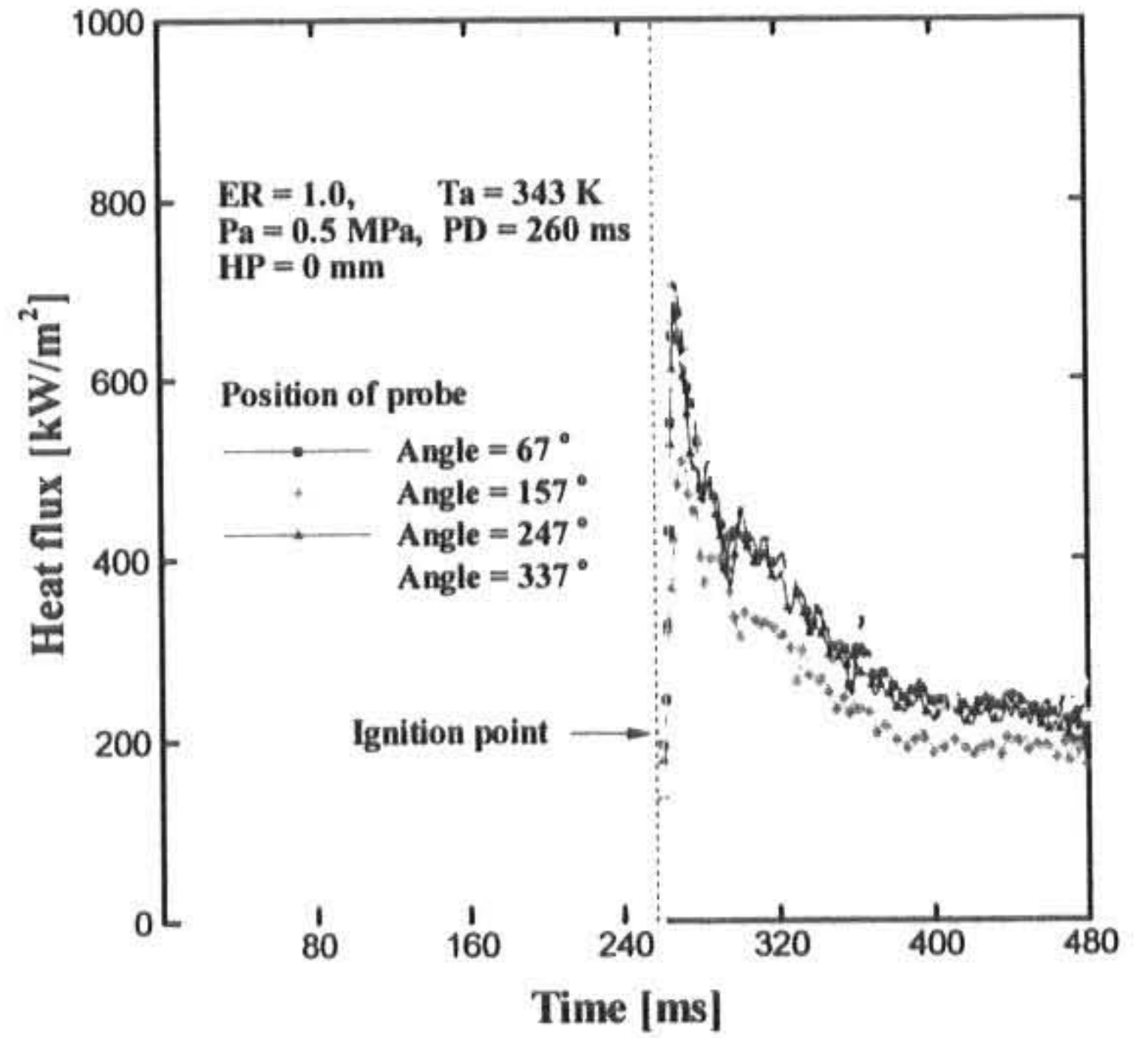


Fig. 13 Unsteady heat flux of wall at ER=1.0 and IT=343 K

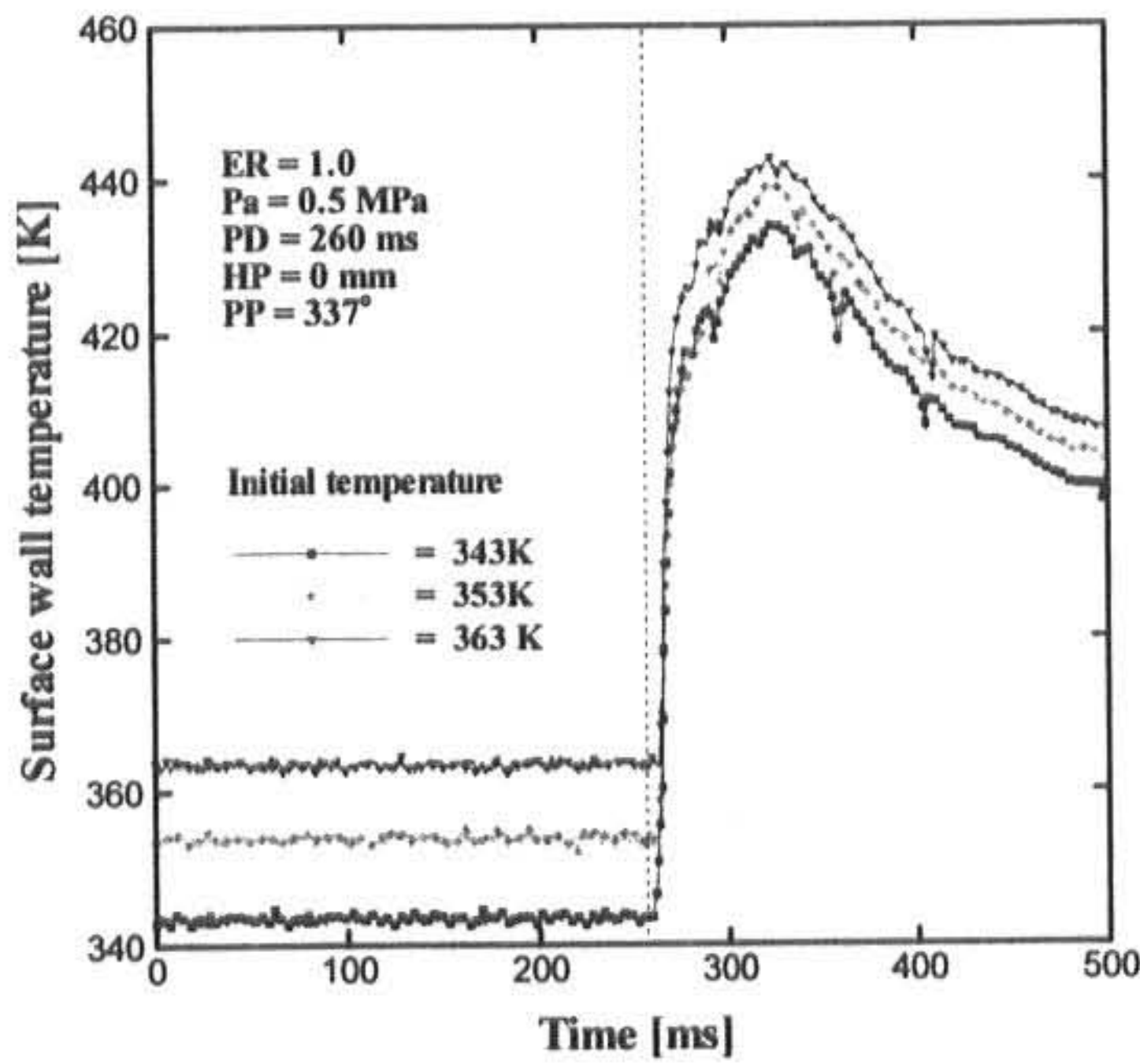


Fig. 11 Surface temperature of wall at ER=1.0 and PP=337°

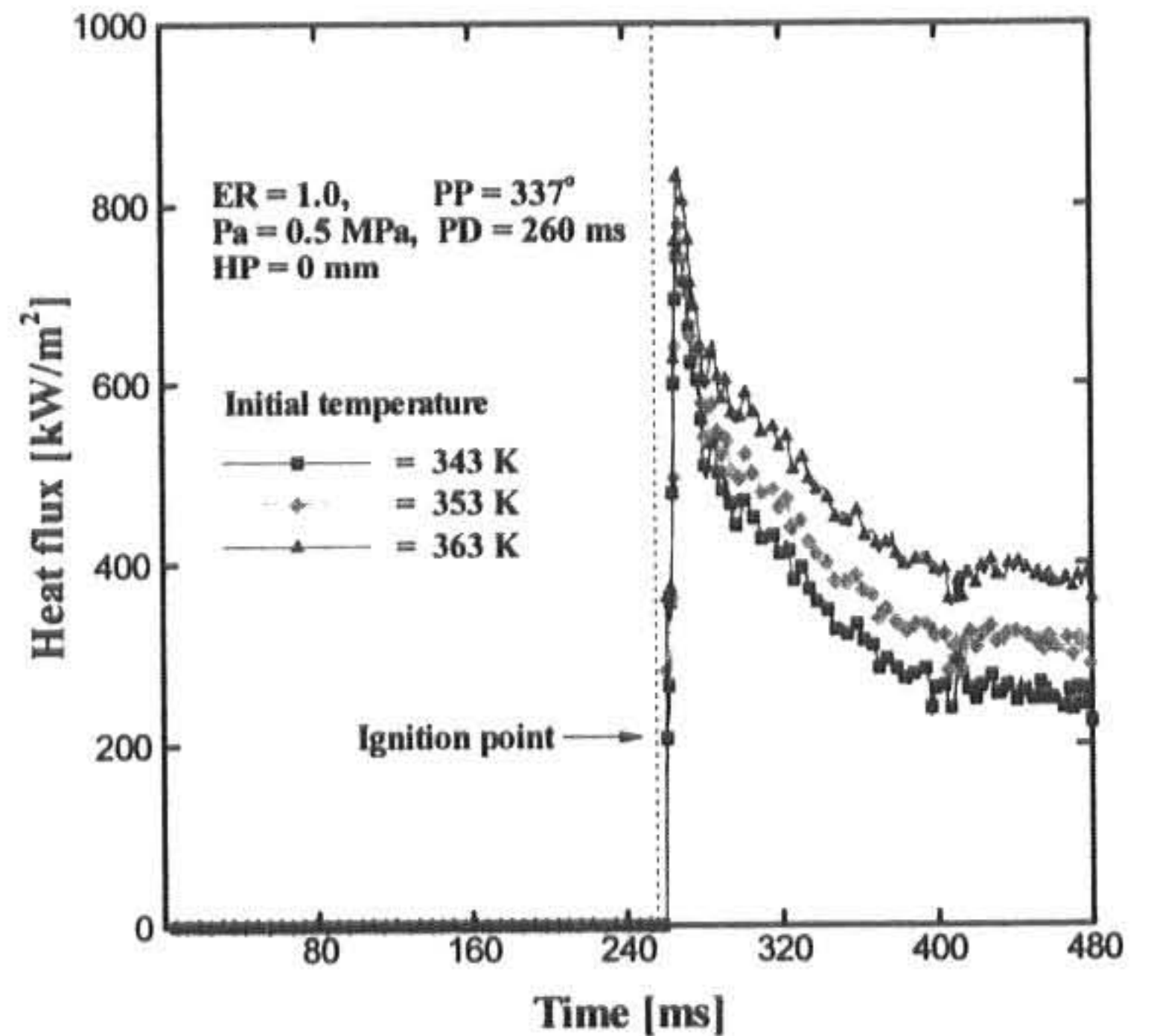


Fig. 14 Unsteady heat flux of wall at ER=1.0 and PP=337°

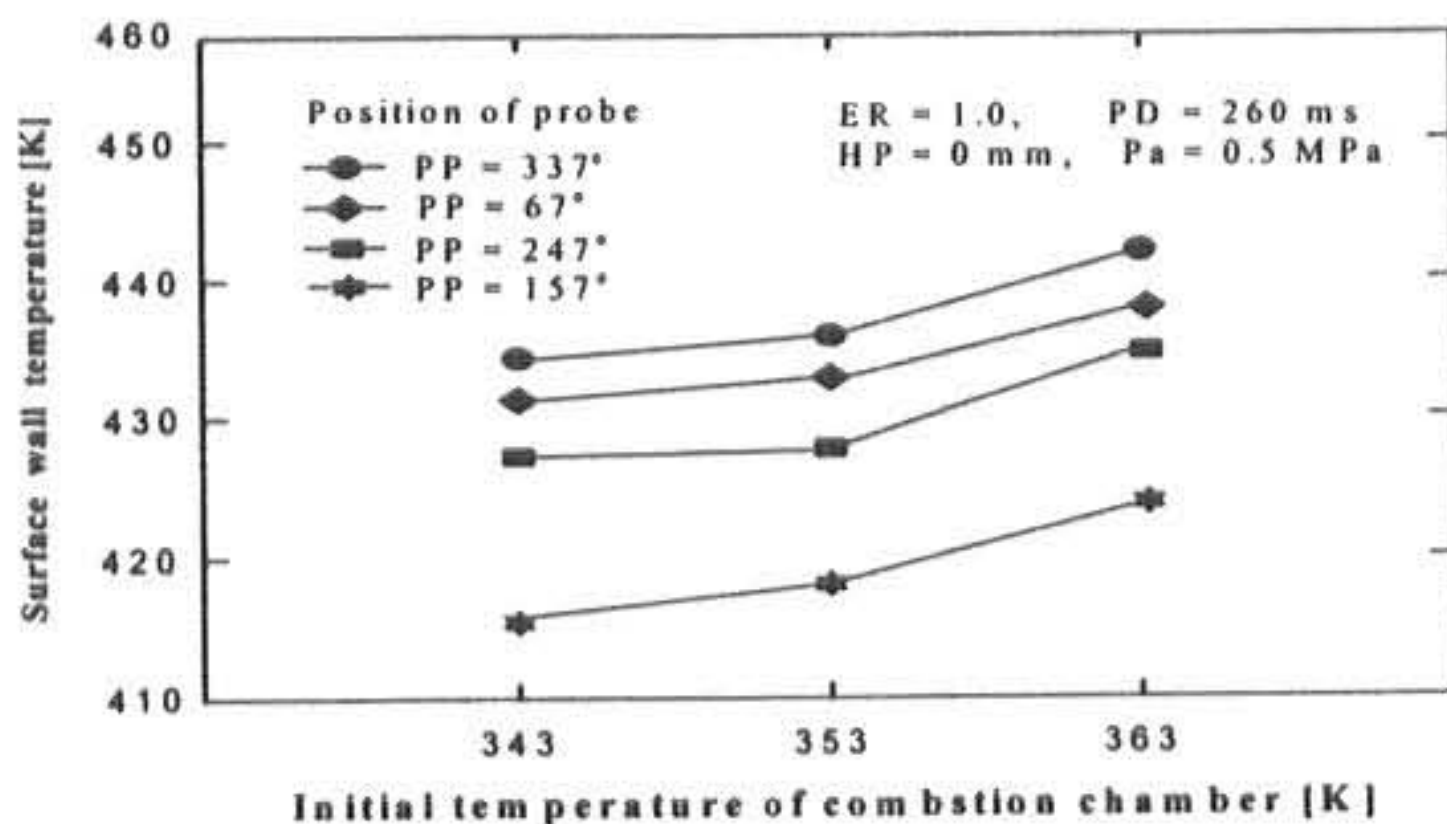


Fig.12 Surface temperature of wall at IT and PP

IT=363 K에서 15,295 kJ/m² 증가하고, IT=343 K에서는 11,090 kJ/m² 감소하였다. 이는 IT=343 K에서 IT=363 K동안의 손실 총열량 변화폭은 IT=343 K에서 IT=353 K에 비해 58% 증가하므로 연소실 벽면에서의 손실 총열량은 연소 초기 온도에 영향을 미친다. 연소 초기 온도가 높은 조건일수록 손실 총열량이 높아지는 것을 알 수 있으며, 그 만큼 냉각손실도 증가함을 알 수 있다.

5. 결론

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

- 1) 연소실 초기온도 IT=343 K, 353 K, 363 K의 조건으로 실험한 결과 최고순간온도는 IT=343 K에서 평균 427 K, IT=353 K에서 평균 429 K, IT=363 K에서는 434 K으로 나타났다. IT=363 K에서 IT=353 K 보다도 평균 5 K정도 높은 순간온도를 나타냈고, 343 K의 조건에서는 평균 7 K정도 높은 493 K으로 나타났다.
- 2) 연소실 초기온도 변화에 따른 연소실 벽면으로 유출되는 손실 총열량은 IT=343 K에서 76,519 kJ/m², IT=353 K에서 87,609 kJ/m², IT=363 K에서는 102,904 kJ/m²으로 나타났다. IT=353 K을 기준으로 해서 IT=363 K에서 15,295 kJ/m² 증가하고, IT=343 K에서는 11,090 kJ/m² 감소하였다.
- 3) IT=343 K에서 IT=363 K동안의 손실 총열량 변화폭은 IT=343 K에서 IT=353 K에 비해 58% 증가하므로 연소실 벽면에서의 손실 총열량은 연소 초기온도에 영향을 미친다. 연소 초기온도가 높은 조건일수록 손실 총열량이 높아지는 것을 알 수 있으며, 그만큼 냉각손실도 증가함을 알 수 있다.
- 2) Eichelberg, “自動車用ガソリン機關の實用時におけるピストン溫度”, 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, “희박연소를 위한 혼합기의 성층급기와 유동에 관한 연구”, KSME, 제 8권 1호, pp.1-9, 2000.
- 6) 이치우, 김지훈, 김시범, “연소실 순간온도 측정에 있어서 돌출높이에 따른 실험적 연구”, 한국박용기관학회, 제25권 제2호, pp.165-172, 2001.
- 7) 이치우, 김시범, “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) 하종률 외 4인, “IDI형 정적연소기에서 점화시기 및 연락공형상이 연소특성에 미치는 영향”, KSME, Vol.4, No.3, No.96370066, pp.220-231, 1996.

(2003년 4월 30일 접수, 2003년 8월 20일 채택)

참고문헌

- 1) Enomoto Y., Furuham, “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.