

돌출높이와 초기온도 변화에 따른 연소실 벽면에서의 열유속에 관한 연구

이치우†

(원고접수일 : 2004년 6월 9일, 심사완료일 : 2004년 8월 27일)

A Study of Heat Flux According to the Initial Temperature of Combustion Chamber and Hight of Probe in a Constant Volume Combustion Chamber

Chi-Woo Lee†

Abstract : As for the production of internal combustion engines, there has been further movement toward development of high performance engines with improved fuel efficiency as well as a lightweight and a small size. These tendencies help to solve the problems in engines, for example, such as thermal load, abnormal combustion and so on. In order to investigate these problems, a thin film-type probe for measuring instantaneous temperature 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 using this probe and the heat flux was obtained through Fourier analysis. In order to thoroughly understand the characteristics of combustion, authors measured wall temperature of combustion chamber and calculated heat flux through a cylinder wall while varying the protrusion height of probe. For these purposes, the instantaneous surface temperature probe was developed, thereby making possible the analysis of instantaneous temperature of wall surface and the detection of unsteady heat flux in the constant volume combustion chamber.

Key words : Instantaneous Temperature Probe(순간온도 프로브), Constant Volume Combustion Chamber(정적연소기), Wall Heat Flux(벽면 열유속), Height of Probe(돌출높이)

1. 서 론

내연기관의 열전달에 관한 연구는 연소실 구성 부품들에 대한 기계적인 강도와 열적인 설계를 위

해서 선행되어야 하는 연구 분야이다. 또한, 자동차 동력성능 측면에서 고출력으로 인한 공급열량의 증가는 출력과 열부하를 동시에 증가시키므로 그에 따른 연소실 내부와 구성품들에 대한 열적

† 책임저자(진주산업대학교 자동차공학과), E-mail : leecw@jinju.ac.kr, T : 055)751-3643

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 벽면은 유효열의 산화 등으로 인해 점성이 저하되므로 이를 방지하기 위해 약 453 K보다 낮게 유지해야 한다.

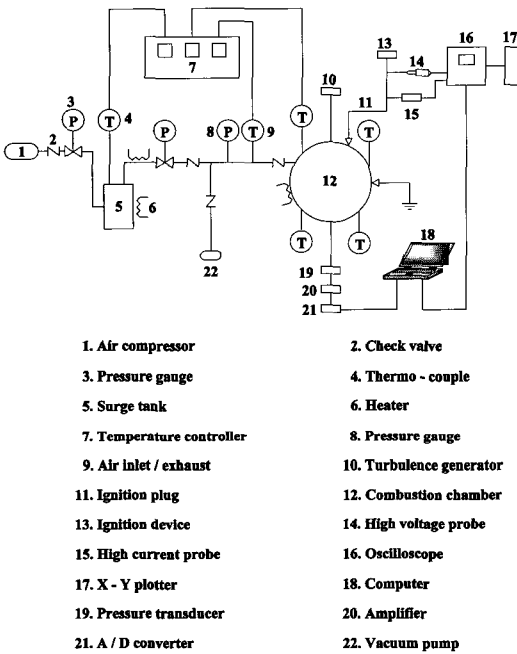


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

연소시 발생하는 가스온도의 변화에 의해 비정상적으로 변화하는 연소실 벽면의 순간온도는 응답성이 빠른 박막형 순간온도 프로브 (instantaneous surface temperature probe)를 이용하여 측정할 수 있다.¹⁾ 연소실내 연소가스로부터 연소실 벽면으로의 열손실 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 돌출높이, 연소초기온도, 측정 위치 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.

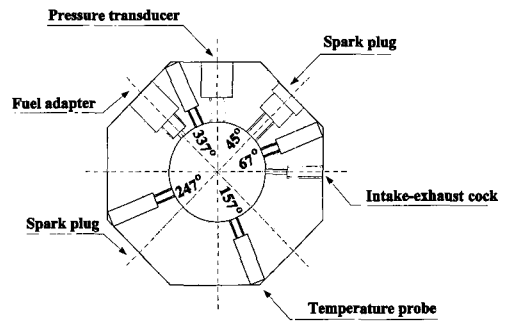


Fig. 2 Schematic diagram of constant volume combustion chamber

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치 및 실험조건

본 실험장치는 정적연소기, 점화장치, 공기 공급장치, 연소실 벽면온도 측정장치,²⁾ 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 정적연소기를 사용하여 실험하였다.³⁾ 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 설치하였다.⁴⁾

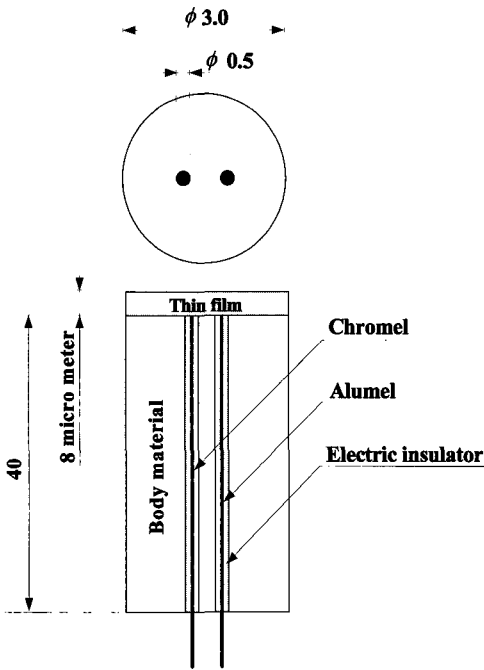


Fig. 3 Schematic of the instantaneous temperature probe used K-type thermocouple

Fig. 3은 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 μm 의 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.⁵⁾ 순간온도 프로브의 모재는 정적연소기와 동일한 재료로서 Al6063을 $\phi 3.0 \times 40 \text{ mm}$ 로 제작하였고, 열전대는 $\phi 0.3 \text{ mm}$ 의 K-type을 사용하였다. 모재의 축방향으로 $\phi 0.5 \times 40 \text{ mm}$ 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. 4는 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 공기와 연소실 벽면을 343 K, 353 K, 363 K의 온도로 유지한 다음 공기 압축기를 이용하여 0.5 MPa의 압력으로 정적연소기의 연소실에 주입시키고, 설정된 양만큼의 가솔린을 분사 시작으로부터 260 ms 후에 점화장치에 의해 점화되도록 하였다. 연소압력 및 연소실 벽면의 순간온도는 정적연소기에 설치된 압력변환기와 순간온도 프로브에 의해서 측정된다.

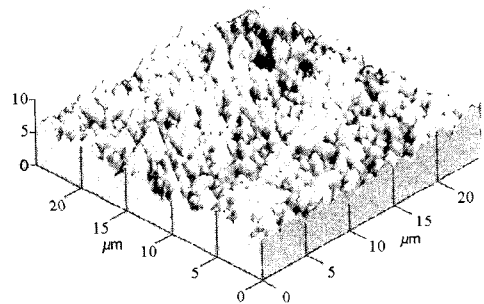


Fig. 4 Photograph showing the measured thickness of the junction

Table 1 Initial conditions of experiment

Parameters	Conditions
Equivalence ratio	ER=1.0
Position of probe	PP=67°, 157°, 247°, 337°
Ignition pressure	IP=0.5 MPa
Fuel	Gasoline
Ignition method	CDI
Premixed duration	PD=260 ms

Table 1은 연료분사 후 점화시기까지의 실험 초기조건으로 당량비(Equivalence ratio) ER=1.0, 순간온도 프로브의 장착위치(Position of Probe) PP=67°, 157°, 247°, 337°, 예혼합기간(Premixed duration)은 분사된 연료가

충분히 기화된 후 재현성 있는 연소가 이루어지도록 PD=260 ms로 설정하여 실험을 행하였다. Table 2는 순간온도 프로브의 돌출높이(Height of probe) HP=0 mm, 1 mm, 2 mm, 연소실 초기온도(Initial temperature) IT=343 K, 353 K, 363 K으로 실험조건을 나타내며, 모든 계측 및 제어를 위해 PC를 사용하였다.

Table 2 Experimental conditions

Parameters	Conditions
Height of probe	HP=0, 1, 2 mm
Initial temperature	IT=343, 353, 363 K

3. 실험결과 및 검토

3.1 순간온도 특성

Fig. 5는 ER=1.0, PP=337°, HP=0 mm, 1 mm, 2 mm의 연소조건에서 IT=343 K, 353 K, 363 K에 따른 순간온도의 특성을 알아보기 위하여 연소시 발생하는 순간온도를 500 ms동안 1,000개의 데이터로써 취득한 결과이다. A점은 점화시기, B점은 순간온도 상승시기, C점은 최고 순간온도 발생시기, D점은 관찰 끝부분이다. 본 연구에서는 연료분사개시부터 점화시기까지를 PD, A점에서 D점까지의 연소에 의한 순간온도의 분포로 구분할 수 있다.

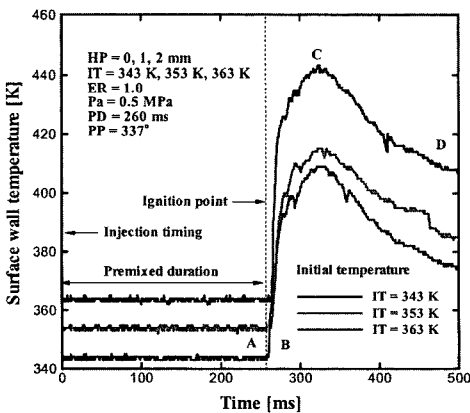


Fig. 5 Typical temperature signal at surface wall of constant volume combustion chamber

A점에서 C점까지의 순간온도 분포로부터 본 연구에서 사용한 순간온도 프로브 응답특성의 재현성 및 고응답성을 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. 이 때 금박막의 두께는 선행된 연구결과를 참고하였다.

3.2 연소실 벽면의 온도 변화

Fig. 6은 HP=0 mm, ER=1.0의 연소조건에서 화염이 측정부 PP=337°를 통과할 때의 최고 순간온도와 온도의 시간분포를 나타낸 것이다.⁶⁾

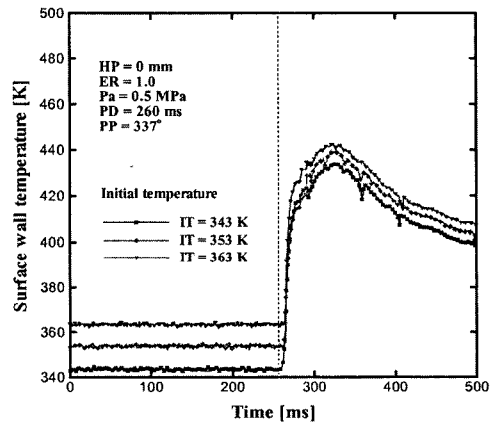


Fig. 6 Surface temperature of wall at HP=0 mm, ER=1.0 and PP=337°

최고순간온도는 IT=343 K에서 435 K, IT=453 K에서 437 K, IT=363 K에서 442 K으로 나타났다. 가장 높은 최고순간온도 442 K과 가장 낮은

최고순간온도 435 K과의 온도차는 7 K으로 나타났다. 연소조건으로부터 초기온도(IT)의 차가 20 K이지만 최고순간온도는 작은 값으로 증가하였으므로 연소실 벽면에서의 최고순간온도는 IT보다는 당량비(ER)와 순간온도 프로브의 돌출높이(HP)에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.⁷⁾

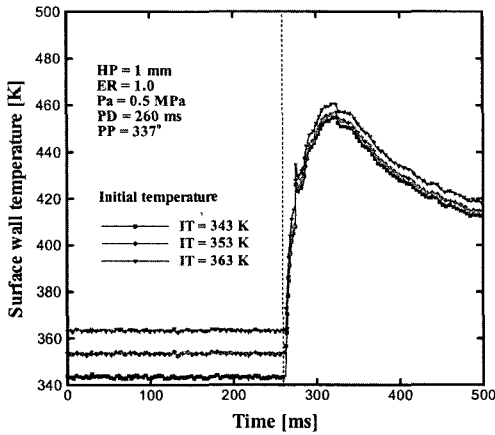


Fig. 7 Surface temperature of wall at HP=1 mm, ER=1.0 and PP=337°

Fig. 7은 HP=1 mm, ER=1.0의 연소조건에서 화염이 측정부 PP=337°를 통과할 때의 최고순간온도와 온도의 시간분포를 나타낸 것이다. IT=343 K에서 454 K, IT=453 K에서 456 K, IT=363 K에서 460 K으로 나타났다.

가장 높은 최고순간온도 460 K과 가장 낮은 최고순간온도 454 K과의 온도차는 6 K으로 나타났다. 화염전파에 의한 온도분포는 HP=0 mm에서와 동일하게 IT=343 K, 353 K, 363 K의 순으로 동일한 정성적인 경향을 보였으며, IT=343 K을 기준으로 연소실 벽면으로부터 1 mm 돌출높이가 증가함에 따라 전체적으로 19 K 정도 순간온도가 증가하는 값으로 나타났다.

Fig. 8은 ER=1.0, HP=2 mm의 연소조건에서 화염이 측정부 PP=337°를 통과할 때의 최고순간온도와 온도의 시간분포를 나타낸 것이다. IT=343 K에서 519 K, IT=453 K에서 520 K, IT=363 K에서 523 K으로 나타났다. 가장 높은 최고순간온도 523 K과 가장 낮은 최고순간온도

519 K과 온도차는 4 K으로 나타났다. 화염전파에 의한 온도분포는 HP=0 mm, 1 mm에서와 동일하게 IT=343 K, 353 K, 363 K의 순으로 동일하게 나타났다. IT=343 K을 기준으로 최고순간온도는 HP=1 mm일 때 보다도 65 K 높고, HP=0 mm 일 때보다 84 K 높은 523 K으로 나타났다. 즉, 벽면으로부터 연소가스 중심쪽으로 2 mm 접근함에 따라 전체적으로 82 K 정도 순간온도가 증가하였고, HP=2 mm 이상부터는 연소가스 화염의 영향으로 인하여 HP=0 mm, 1 mm에서와 같이 온도분포가 일정하지 않음을 알 수 있었다.

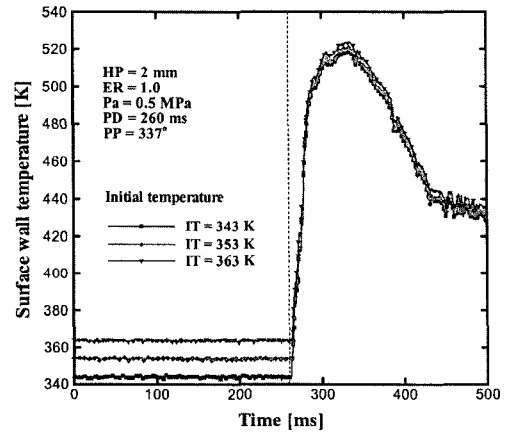


Fig. 8 Surface temperature of wall at HP=2 mm, ER=1.0 and PP=337°

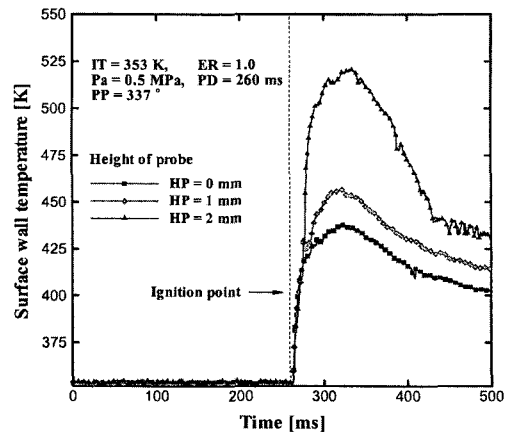


Fig. 9 Surface temperature of wall at IT=353 K, ER=1.0 and PP=337°

Fig. 9는 IP=353 K, ER=1.0의 연소조건에서 화염이 측정부 PP=337°를 통과할 때의 최고순간온도를 비교하여 나타낸 것이다. HP=0 mm에서 최고순간온도는 435 K, HP=1 mm에서는 HP=0 mm보다도 19 K 높은 454 K이고, HP=2 mm에서는 HP=1 mm보다도 65 K 높고, HP=0 mm보다도 84 K 높은 519 K으로 나타났다. HP=0 mm에서 HP=2 mm 동안의 최고순간온도 변화폭은 HP=0 mm에서 HP=1 mm에 비해 78% 증가한 것으로 연소실내의 순간온도는 벽면으로부터 연소가스로 근접할수록 급격히 상승하고, 돌출높이에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 ER=1.0, PP=337°에서 IT=343 K, 353 K, 363 K 및 HP=0 mm, 1 mm, 2 mm의 주어진 연소조건에서 연소시킬 때 화염이 측정부를 통과할 때의 최고순간온도를 비교하여 나타낸 것이다. 가장 높은 순간온도는 IT=363 K, HP=2 mm에서 523 K이었으며, 돌출높이 증가에 따라 순간온도는 정성적으로 증가하지만 HP=2 mm부터 급격한 순간온도의 증가로 나타났다으며, 연소실 초기온도 증가에 따른 공급열량의 증가에 의해 연소실 벽면의 순간온도가 정성적으로 증가함을 알 수 있었다.

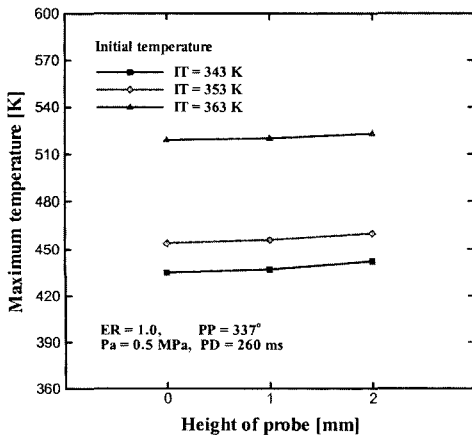


Fig. 10 Surface temperature of wall at ER=1.0 and PP=337°

4.3 연소실 벽면의 열유속 변화

Fig. 11은 IT=363 K, ER=1.0, HP=0 mm

의 연소조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 화염온도를 이용해서 비정상 순간 열유속으로 변환하였다. 점화가 이루어지면 순간온도는 급격히 상승하면서 연소실 벽면으로의 손실 열량이 빠져나가고 있다. 즉, IT=363 K, 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.

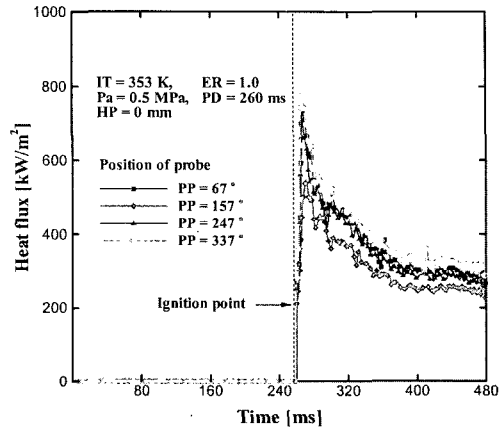


Fig. 11 Unsteady heat flux of wall at IT=363 K, ER=1.0 and HP=0 mm

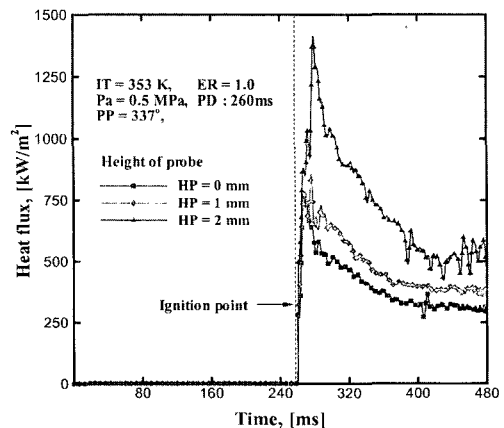


Fig. 12 Unsteady heat flux of wall at IT=353 K, ER=1.0 and PP=337°

Fig. 12는 $IT=353\text{ K}$, $ER=1.0$, $PP=337^\circ$. 주어진 돌출높이 조건에서 연소시킬 때 화염이 측정부를 통과할 때 최고순간온도와 온도의 시간분포로부터 비정상 순간 열유속으로 변환하였다. 돌출높이 증가에 따라 연소실 벽면으로 유출되는 손실 총열량은 $HP=0\text{ mm}$ 에서 $38,613\text{ kJ/m}^2$, $HP=1\text{ mm}$ 에서 $46,579\text{ kJ/m}^2$, $HP=2\text{ mm}$ 에서는 $69,765\text{ kJ/m}^2$ 으로 나타났다. $HP=1\text{ mm}$ 에서는 $HP=0\text{ mm}$ 보다도 $7,966\text{ kJ/m}^2$ 정도 높게 나타났고, $HP=2\text{ mm}$ 에서는 $HP=1\text{ mm}$ 보다 $23,186\text{ kJ/m}^2$ 정도 높고, $HP=0\text{ mm}$ 일 때 보다는 $31,152\text{ kJ/m}^2$ 정도 높게 나타났다.

이는 $HP=0\text{ mm}$ 에서 $HP=2\text{ mm}$ 동안의 손실 총열량 변화폭은 $HP=0\text{ mm}$ 에서 $HP=1\text{ mm}$ 에 비해 74% 증가하였다. 돌출높이의 증가에 따라 손실 총열량은 거의 선형적으로 증가하였으며, $HP=2\text{ mm}$ 에서 아주 높은 손실 총열량을 보였다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 연소실내의 순간온도는 벽면으로부터 연소가스로 근접할수록 급격히 상승하고, 돌출높이에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

정적연소기내에서 비정상 열부하를 해석하기 위하여 박막형 순간온도 프로브를 제작하여 연소초기온도, 당량비, 박막형 순간온도 프로브의 돌출높이 및 장착위치에 따라 연소실 벽면에서의 순간온도 및 순간열유속에 미치는 영향에 대해 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. $IT=343\text{ K}$ 을 기준으로 최고순간온도는 $HP=1\text{ mm}$ 일 때 보다도 65 K 높고, $HP=0\text{ mm}$ 일 때보다 84 K 높은 523 K 으로 나타났다. 즉, 벽면으로부터 연소가스 중심쪽으로 2 mm 접근함에 따라 전체적으로 평균 82 K 정도 높게 순간온도가 증가하였다.
2. $HP=0\text{ mm}$ 에서 $HP=2\text{ mm}$ 동안의 최고순간온도 변화폭은 $HP=0\text{ mm}$ 에서 $HP=1\text{ mm}$ 에 비해 78% 증가한 것으로 연소실내의 순간온도는 벽면으로부터 연소가스로 근접할수록 급격

히 상승하였다.

3. $HP=0\text{ mm}$ 에서 $HP=2\text{ mm}$ 동안의 손실 총열량 변화폭은 $HP=0\text{ mm}$ 에서 $HP=1\text{ mm}$ 에 비해 74% 증가하였다. 돌출높이의 증가에 따라 손실 총열량은 거의 선형적으로 증가하였으며, $HP=2\text{ mm}$ 에서 높은 손실 총열량을 보였다.

후 기

본 연구는 진주산업대학교 2004학년도 연구지원비에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Y. Enomoto and F. Furuhashi, "Study on Thin Film Thermocouple for Measuring Instantaneous Temperature on Surface of Combustion Chamber Wall in a Internal Combustion Engine," Bulletin of JSME paper, 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 paper, No. 930868, 1993.
- [4] 多田, "Temperature Measurement in Rotor Bearing of Rotary Engine," Bulletin of the JSAE paper, No. 7, pp 11-12, 1976.
- [5] 榎本 良輝 "自動車エンジンの温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.
- [6] Chi-Woo Lee, Hun-Soo Byun and Chan-Yeul Jung, "High Pressure Phase Behavior of Carbon Dioxide - 1 - Methyl

- 2 - Pyrrolidinone and Carbon Dioxide
- 1 - Ethyl - 2 - Pyrrolidinone Systems,"
AIChE paper, Vol. 49, No. 1, pp 53-57,
2003.

- [7] Chi-Woo Lee, Chi-Won Kim and
Si-Pom Kim, "A study of heat flux in a
constant volume combustion," IMechE
paper, Vol. 217, No. 9, pp 825-832,
2003.

저 자 소 개



이치우 (李致雨)

1965년 8월생, 1991년 동아대학교 기계공학과 공학사, 2000년 동대학원 기계공학과 공학박사, 1993년~1995년 대우자동차(주) 기술연구소 차량 시험실 주임연구원, 1995년~2004년 마산대학 자동차공학과 부교수, 현재

진주산업대학교 자동차공학과 재직중