

## 이중분사식 수소기관의 비정상 열부하 해석에 관한 연구

위신환, 김윤영, 김홍준(성균관대원), 이종태(성균관대)

성균관대학교 기계공학과  
수원시 장안구 천천동 300, 440-746

### A Study on Unsteady Thermal Loading of Hydrogen Engine with Dual Injection

Shin-Whan Wei, Yun-Young Kim, Hong-Jun Kim, Jong-Tai Lee

School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University  
300 Chunchun-dong, Jangan-gu, Suwon, 440-746, Korea

#### Abstract

To measure of thermal loading in the combustion chamber of hydrogen engine with dual injection, instantaneous wall-surface temperature and unsteady heat flux of the cylinder head are measured and analyzed. The maximum wall surface temperature is shown in direct injection region which has large heat supplied. Partial and spatial temperatures have slight deviation in transient region of injection, though injection method change suddenly. All of thermal characteristics such as instantaneous temperature, temperature swing and heat flux of hydrogen engine with dual injection are remarkably higher than those of gasoline engine. It means necessity of additional countermeasure of thermal loading.

**Keyword:** Instantaneous surface temperature(벽표면순간온도), Unsteady heat flux(비정상 열유속), Hydrogen engine with dual injection(이중분사식 수소기관)

## 1. 서론

이중분사식 수소기관은 수소가스를 저부하 운전영역에서 흡기관 내로 공급하고 고부하 영역에서 실린더내로 공급하여, 모든 운전 영역에서 고효율 및 고출력을 얻을 수 있는 수소기관이다<sup>1-4)</sup>.

이중분사식 수소기관은 흡기관 분사로부터 직접분사로 분사방식이 전환되는 천이영역이 있으므로 혼합기 공급방식의 변화에 따른 급격한 벽표면온도의 변화 및 국부적인 온도편차 등이 발생될 수 있다. 또한 이중분사식 수소기관은 고부하 운전시 수소연료를 실린더내 직접 분사하는데 따른 공급열량의 증가와 수소연료의 높은 단열화염온도 및 큰 열전달계수로 인하여 연소실 벽표면온도는 흡기관내 분사방식 수소기관 및 가솔린기관의 경우보다 증가한다.

이로 인하여 이중분사식 수소기관의 냉각손실 및 열부하가 현저히 증가하여, 심한 경우 연소실 구성 부품에 열적장해를 초래할 수 있으므로 이에 대한 열부하대책이 필요하다.

열부하 대책을 위해서는 연소실 벽표면온도와 열유속의 거동 및 분포를 해석하여야 한다. 기관의 열부하는 벽표면온도 및 열유속의 평균치가 아닌 최대치에 좌우되므로 순간적으로 변화하는 값으로 해석하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 DOHC 연소실을 갖는 이중분사식 수소기관의 실린더헤드를 대상으로 분사방식의 변화에 따른 연소실 벽표면의 순간온도 및 열유속을 측정하고, 그 거동 및 분포를 동일한 연소실 형상을 갖는 가솔린기관의 결과와 비교하였다.

## 2. 순간온도프로브 및 실험장치

### 2.1 순간온도프로브 및 삽입위치

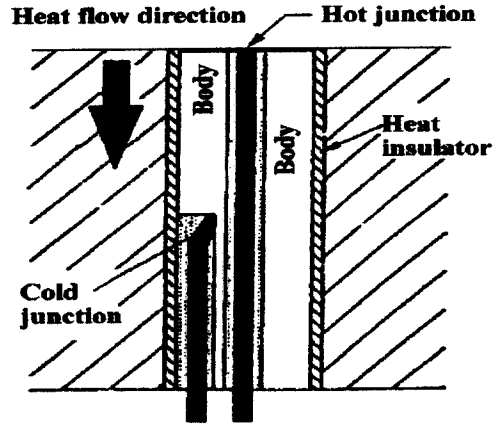


Fig. 1 Schematic of the instantaneous temperature probe.

실린더헤드의 벽표면순간온도 및 비정상 순간열유속의 측정에는 Fig. 1과 같은 박막형 순간온도프로브를 제작하여 사용하였다.

프로브의 표면에는 연소실 벽표면의 순간온도를 측정하기 위해 10 $\mu$ m 두께의 동(Cu) 도금으로 열접점(hot junction)을 구성하였다. 벽표면의 순간열유속을 측정하기 위해서는 벽표면 순간온도 뿐만 아니라 임의 깊이의 온도를 계측하여야 한다. 따라서 순간온도 프로브의 열접점에서 수직방향으로 임의 깊이 떨어진 위치에 냉접점(cold junction)을 구성하였다.

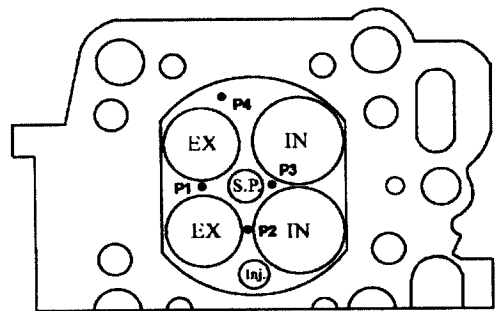


Fig. 2 Insert location of instantaneous temperature probes.

박막형 순간온도프로브에서 임의 깊이에 삽입된 냉접점 온도는 두 소선의 기전력 차이로 직접 측정된다. 그리고, 벽표면순간온도인 열접점의 온도는 열접점에 한 소선만을 삽입하고 그 소선과 동일한 냉접점의 소선과 연결하여, 두 접점 사이의 온도차 및 냉접점 온도의 합으로 측정된다. 비정상 열유속은 열접점 및 냉접점의 온도차로 결정되므로 박막형 순간온도프로브로 벽표면순간온도와 비정상 열유속을 동시에 측정할 수 있다<sup>5)</sup>.

제작한 각각의 프로브는 프로브로부터 출력되는 기전력을 온도로 환산하기 위해 전기로 내에 표준온도계와 함께 넣어 검정을 실시하였다. 검정 결과, 열접점과 냉접점의 기전력대 온도의 환산계수는 각각 40.7°C/mV와 23.6°C/mV로 모든 프로브가 거의 동일한 값이었다.

Fig. 2는 실린더 헤드에 삽입한 순간온도 프로브의 삽입위치를 나타낸 것이다. 벽표면순간온도 및 순간열유속은 실린더헤드의 각 지점에 따라 벽면의 기하학적 형상, 냉각수 유동형태 등의 차이로 인해 국부적으로 매우 큰 차이를 나타낸다. 따라서 프로브의 삽입위치는 벽표면온도 및 열유속을 전반적으로 파악할 수 있는 위치로 선정하였다. 실린더헤드에 삽입된 순간온도프로브는 스파크 플러그 부근, 배기밸브 브릿지와 연소실 바

깎쪽에 각각 1개씩, 그리고 흡기밸브와 배기밸브사이에 1개, 모두 4개를 삽입하였다.

### 2.2 실험장치 및 방법

Fig. 3은 실험장치의 개략도 및 실물사진을 나타낸 것이다. 실험장치는 이중분사식 수소기관, 수소분사밸브 제어부, 흡배기계통, 수소가스 공급계통, 동력측정장치, 냉각계통 및 각부의 온도와 압력 측정장치 등으로 구성된다.

이중분사식 수소기관은 4행정 단기통 스파크 점화기관으로 제원은 Table 1과 같다. 가솔린연료를 사용하는 기관은 이중분사식 수소기관과 연소실 형상, 보어, 및 스트로크가 동일한 4기통 기관이다.

벽표면순간온도 및 비정상 순간열유속의 측정실험은 기관회전수 및 기관부하를 변화

Table 1 Specification of the test engine.

Engine Type	4-Stroke
Combustion Chamber Type	Pent Roof
Valve Mechanism	DOHC
Bore × Stroke (mm)	86.0 × 86.0
Compression Ratio	9.2 : 1

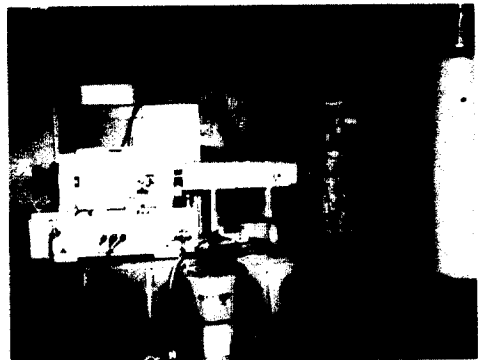
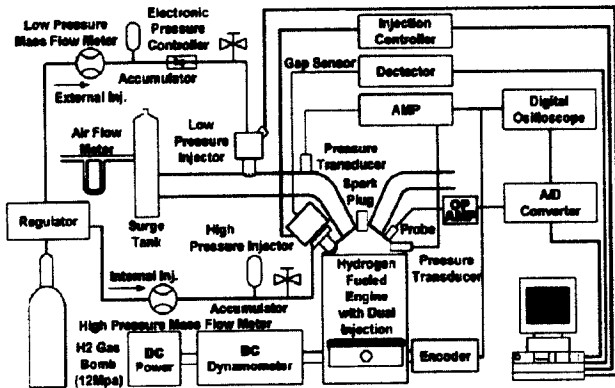


Fig. 3 Schematic diagram and photograph of the experimental apparatus.

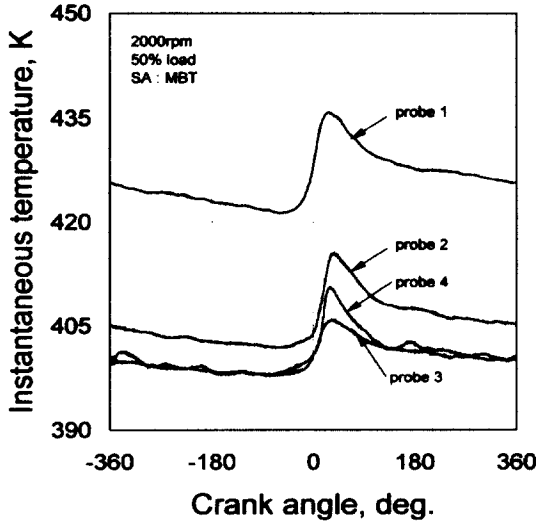


Fig. 4 Instantaneous surface temperatures at measuring position.

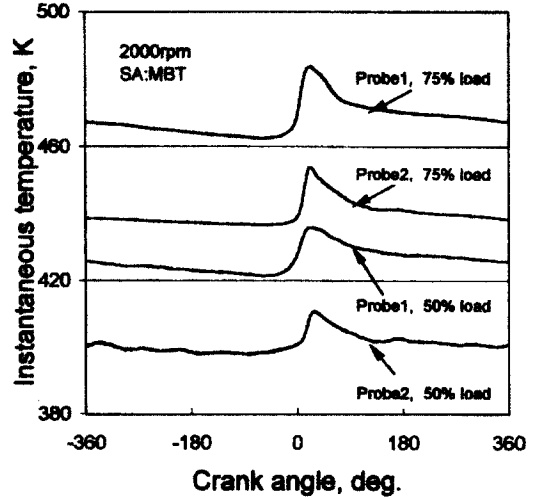


Fig. 6 Instantaneous temperature in the transient region of injection.

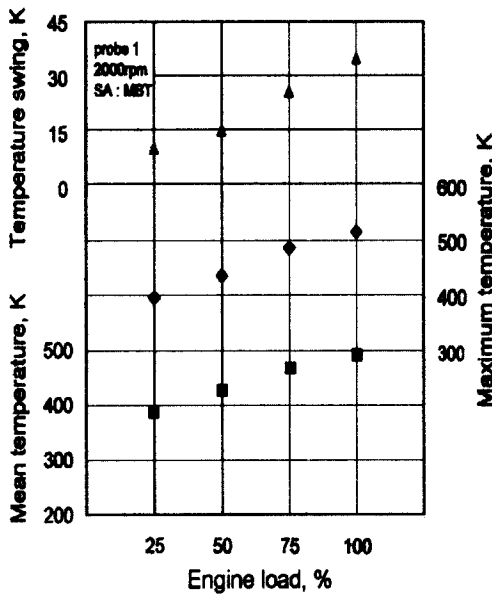


Fig. 5 Temperature swing and surface temperature versus engine load.

소연료의 공급방식은 25%와 50%부하인 경우 흡기관분사방식이며 75%와 전부하인 경우 직접분사방식이다. 각각에 대한 실험조건으로는 점화시기는 MBT이며, 냉각수 출구 온도는 80℃로 일정하게 유지하였다.

### 3. 이중분사식 수소기관의 벽표면순간온도 및 순간열유속의 해석

#### 3.1 분사방식의 변화에 따른 열부하 비교

Fig. 4는 이중분사식 수소기관의 실린더헤드의 벽표면 순간온도를 각각의 측정위치에 대해 나타낸 것이다. 여기서 기관부하는 50%부하로 수소연료의 공급방식은 흡기관 분사방식이다.

각 지점의 순간온도 파형은 흡입 및 압축 과정 중 완만히 감소하다가 점화 시부터 급격히 상승하여 최고치를 나타낸 후 팽창 및 배기 과정중 감소하는 경향을 나타낸다. 벽

시켜 수행하였다. 이중분사식 수소기관의 수

표면순간온도는 배기밸브 브릿지부가 현저히 높으며, 다른 3지점의 온도는 거의 비슷한 크기를 보이고 있다. 이것은 배기밸브 브릿지의 위치가 두 개의 배기밸브 사이에 위치함으로서 고온의 기연가스에 장시간 노출되며 냉각수 유동이 빈약한 기하학적 형상을 갖는데 기인한다.

연소실 벽표면의 평균온도는 배기밸브 브릿지부인 1번 프로브가 426K 정도로서, 다른 지점에 비해 최고 24K 정도 높은 값을 나타냈다.

상기 결과는 DOHC 형상을 갖는 실린더 헤드의 경우 배기밸브 브릿지부의 열부하가 다른 지점에 비해 현저하다는 것을 나타내는 것이다.

이중분사식 수소기관의 혼합기 공급방식의 변화에 따른 열부하 특성의 변화를 살펴보고자, Fig. 5에 열부하가 가장 큰 1번 지점의 벽표면 평균온도와 최고온도 및 온도스윙을 기관부하변화에 대해 나타낸다.

벽표면 평균온도 및 최고온도는 기관부하가 증가함에 따라 공급열량의 증가로 거의 일정한 증가율로 증가하는 경향을 나타낸다.

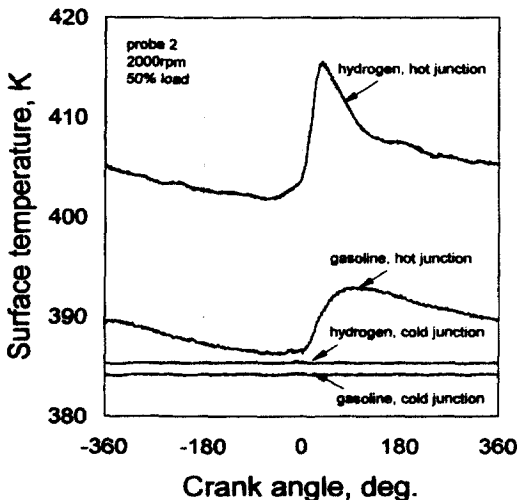


Fig. 7 Wall temperatures in case of hydrogen engine and gasoline engine.

배기밸브 브릿지부의 최고온도는 전부하 운전시 약 517K로 25%부하 운전시의 약 396K에 비해 약 121K정도나 현저히 높은 것을 보인다.

한편 벽표면 온도진폭은 최고온도 및 평균온도와 같이 기관부하가 증가함에 따라 증가한다. 그러나 온도진폭의 증가율은 흡기관분사영역인 50%부하 조건에서 직접분사영역인 75% 부하로 분사방식이 천이되는 구간에서 급격히 증대하는 경향이다. 이는 직접분사영역인 고부하 조건에서 연소실 벽면으로의 열손실이 증가함을 나타내는 것이다. 직접분사영역의 온도진폭의 증가율은 약 74%로 흡기관분사 영역의 약 50%보다 큰 값을 나타낸다.

흡기관 분사로부터 직접분사로 분사방식이 전환되는 천이영역에서의 벽표면순간온도 및 온도편차의 변동을 살펴보고자 열부하가 가장 큰 1번과 인젝터와 가장 가까운 2번 지점의 순간온도를 비교하여 나타낸 것이 Fig. 6이다.

각 지점의 벽표면온도는 기관부하의 증가 즉, 분사방식이 흡기관분사에서 직접분사로

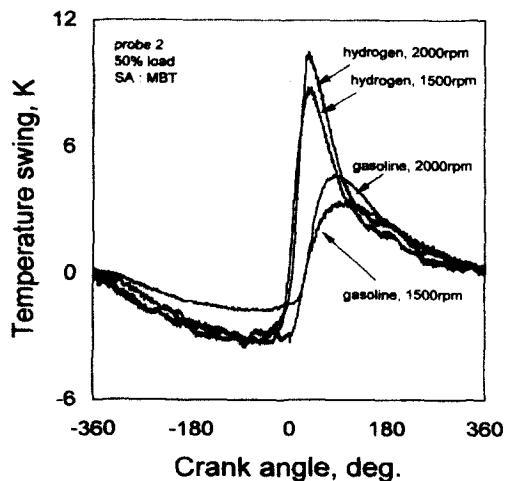
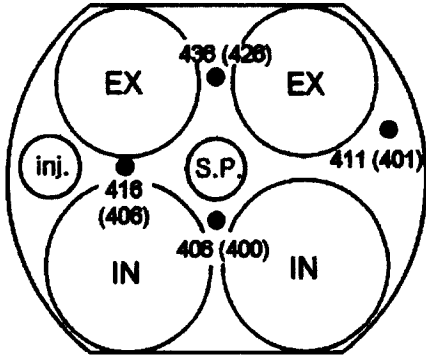
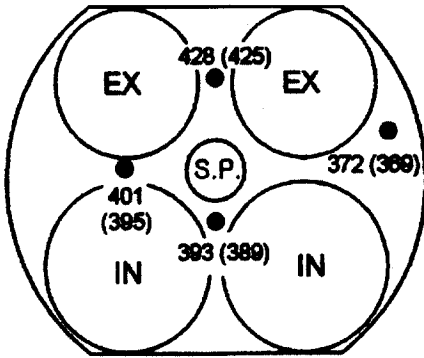


Fig. 8 Temperature swing in case of hydrogen engine and gasoline engine.



(a) Hydrogen engine with dual injection



(b) Gasoline engine

Fig. 9 Distribution of maximum and mean temperatures.

전환함에 따라 증가함을 나타낸다. 벽표면온도의 증가율은 1번 지점의 경우 약 42K, 2번 지점은 약 39K 정도로 거의 유사하다. 동일 조건에서 두 지점간 온도편차는 실린더내 직접분사영역의 경우 29K로 흡기관 분사영역의 25K보다 약간 증가함을 나타낸다.

상기와 같이 이중분사식 수소기관에서 분사방식의 전환에 따른 벽표면순간온도의 해석결과, 급격한 벽표면 온도변동 및 공간적 온도편차는 없었으며, 벽표면 최고온도는 흡입공기량의 증가에 의한 공급열량이 큰 직

접분사영역에 의존함을 알 수 있었다.

### 3.2 이중분사식 수소기관과 가솔린기관의 열부하 비교

Fig. 7은 이중분사식 수소기관의 2번 지점의 벽표면순간온도 및 냉점점의 온도를 동일한 연소실 형상을 갖는 가솔린기관의 경우와 비교한 것이다. 여기서 이중분사식 수소기관의 연료공급방식은 가솔린기관과 운전조건이 유사한 흡기관 분사방식이다.

연소실 벽표면의 순간온도는 이중분사식 수소기관 및 가솔린기관 모두 사이클이 진행함에 따라 모두 급격히 상승하다 최고치를 이룬 후 감소한다. 그러나 냉점점의 온도는 거의 변함없이 일정한 온도를 나타낸다. 동일 지점의 열점점 및 냉점점의 온도는 이중분사식 수소기관의 경우가 가솔린기관의 경우보다 모두 높다. 온도 차이는 수소연료의 단열화염온도 및 연소속도가 가솔린에 비해 큰데 기인하여 냉점점보다 열점점이 현저하다. 연소실 벽표면 평균온도 및 최고온도는 이중분사식 수소기관의 경우 각각 406K, 416K로 가솔린기관에 비해 각각 17K, 23K정도 큰 것을 보인다.

Fig. 8은 상기의 측정지점에서의 벽표면 온도진폭을 가솔린기관의 경우와 비교한 것이다.

전술한 바와 같이 연소실 벽표면 순간온도는 이중분사식 수소기관 및 가솔린기관 모두 급격히 상승하다 감소하는 경향이다. 그러나 이중분사식 수소기관의 온도파형은 가솔린에 비해 상승률 및 온도 진폭이 상대적으로 크며, 최고온도가 나타나는 시점이 빠른 것을 나타낸다. 이는 수소연료의 연소속도가 가솔린기관에 비해 상대적으로 빠르기 때문으로 생각된다.

온도진폭은 2000rpm조건에서 수소기관의 경우 약 14K로 가솔린기관의 약 7K에 비해 2배정도 큰 값을 나타낸다. 수소기관 및 가솔린기관 모두 기관회전수의 증가에 따른 공급열량의 증가로 연소실 벽표면 온도의 최고치 및 평균치는 증가한다. 그러나 두 경

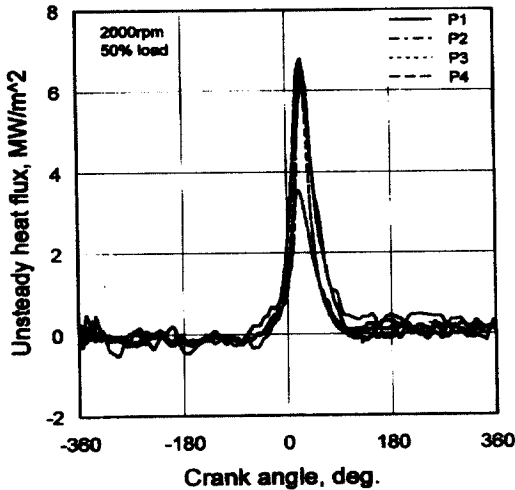


Fig. 10 Unsteady heat flux at each measuring position.

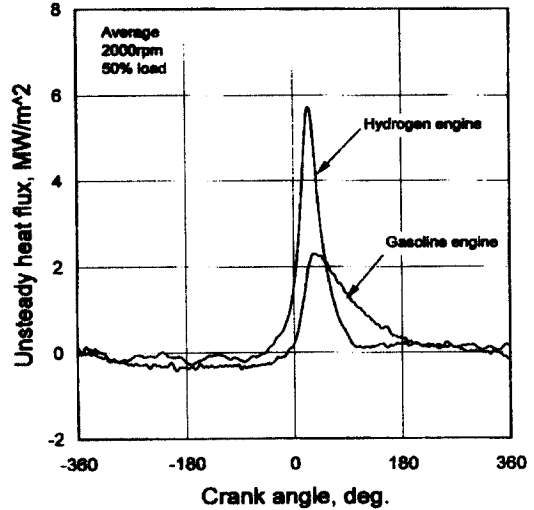


Fig. 11 Comparison of heat flux of hydrogen engine and gasoline engine.

우 모두 온도진폭의 차이는 그리 크지 않다. 이는 기관회전수의 증가에 따른 단위 크랭크각당 시간감소로 한 사이클 동안의 열전달기간이 감소하기 때문으로 생각된다.

이중분사식 수소기관의 벽표면 평균온도 및 최고온도의 분포를 가솔린기관의 경우에 대해 비교한 것이 Fig. 9이다.

수소기관 및 가솔린기관의 최고온도와 평균온도의 공간분포는 실린더헤드의 각 위치에 따라 국부적으로 차이를 나타낸다.

수소 및 가솔린기관의 최고온도와 평균온도는 두 기관 모두 배기밸브 브릿지부인 1번 지점에서 가장 높은 것을 보이고 있다. 그러나 이 이외의 지점에서의 온도분포는 기관에 따라 약간 차이를 나타낸다. 이는 연료의 연소속도 및 신기의 냉각효과 등에 차이에 의한 것을 생각된다.

이중분사식 수소기관의 벽표면 평균온도 및 최고온도는 가솔린기관의 경우에 비하여 지점에 따라 9K에서 최고 32K정도 높고, 벽표면 최고온도는 6K에서 최고 40K정도 높다. 이는 이중분사식 수소기관의 경우가

가솔린기관에 비해 이상연소의 원인이 되는 열점이 생성되기 쉽다는 것을 의미한다.

그러나 동일 기관에서 위치에 따른 벽표면 최고온도의 최대치와 최소치의 차이는 수소기관의 경우 약 30K정도로써 가솔린기관의 약 56K에 비해 오히려 작은 것을 보이고 있다. 이 결과로부터 이중분사식 수소기관이 가솔린기관에 비해 연소실 벽면온도는 높으나 벽면온도의 균일화 측면에서는 유리함을 알 수 있다.

Fig. 10은 연소실 각부의 비정상 순간열유속을 나타낸 것이다. 여기서 기관부하는 50%, 기관회전수는 2000rpm이다.

각 지점의 열유속 파형은 흡입 및 압축과정의 초반까지 약간 감소하다가 압축과정 중 압축열에 의해 점차로 증가하며, 상사점 근방에서 급격히 상승하여 최대치를 보인 후 급격히 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 배기밸브 브릿지부인 1번 지점의 순간열유속은 다른 지점에 비해 팽창과정 후반부 및 배기과정 중반부에도 상당 기간동안 상대적으로 큰 것을 나타낸다. 이것은 배기밸브 브릿지부가 다른 지점에 비해 지속적인

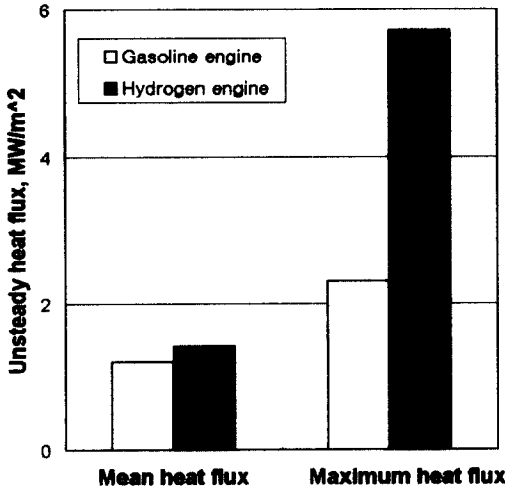


Fig. 12 Comparison of mean heat flux and maximum heat flux in the hydrogen engine and gasoline engine.

열부하의 집중되고 있음을 의미하는 것이다.

순간열유속의 최대치가 나타나는 곳은 연소실 바깥쪽에 위치한 4번 지점이다. 그 크기는 약  $6.8\text{MW/m}^2$ 로서 벽표면온도가 가장 높은 배기밸브 브릿지부인 1번 지점의 약  $6.5\text{MW/m}^2$ 보다 큰 것을 보인다. 이는 비정상 순간 열유속이 벽표면 순간온도와 임의 깊이의 온도 및 온도진폭에 좌우되는데 의한 것이다.

Fig. 11은 이중분사식 수소기관 실린더헤드의 전공간에 대해 공간평균한 순간열유속을 가솔린기관의 경우와 비교하여 나타낸 것이다.

연소실 벽면으로의 순간열유속은 수소기관과 가솔린기관 모두 상사점 근방에서 급격히 상승하여 최대치를 이루고 급격히 감소하는 경향이다. 그러나 전술한 바와 같이 수소연료가 가솔린연료에 비해 상대적으로 연소속도가 빠르고 화염온도가 높다. 이로 인해 순간열유속의 상승률 및 최고치는 벽표면 순간온도와 마찬가지로 가솔린기관의 경우에 비해 상대적으로 크며, 최고치 이후 순간열유속의 감소율도 현저하다.

상기의 순간열유속 결과로부터 구한 연소기간 동안의 평균 및 최고 열유속을 가솔린과 수소기관에 대해 비교하여 나타낸 것이 Fig. 12이다.

연소과정 중 이중분사식 수소기관의 평균 열유속은 가솔린기관의 경우와 그리 큰 차이가 없다. 그러나 공간평균 순간열유속의 최대치는 수소기관의 경우가 약  $5.8\text{MW/m}^2$ 으로, 가솔린기관에 비해 2.5배 정도 큰 값을 나타낸다. 상기의 결과는 단위시간당 연소실 벽면으로의 전열량이 큼을 의미하며, 이는 수소기관의 경우 빠른 연소속도에 의해 단위시간당의 발생열량과 화염온도가 큰 것에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 이중분사식 수소기관의 연소실 설계시 가솔린기관보다 큰 열적강도를 고려해야 할 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

이중분사식 수소기관의 실린더헤드를 대상으로 벽표면 순간온도 및 순간열유속을 측정하여 가솔린 기관과 비교하여 얻은 해석결과는 다음과 같다.

1. 이중분사식 수소기관에서 분사방식의 전환에 따른 벽표면순간온도의 해석결과, 급격한 벽표면 온도변동 및 공간적 온도편차는 없었으며, 벽표면 최고온도는 흡입공기량의 증가에 의한 공급열량이 큰 직접분사영역에 의존함을 알 수 있었다.
2. 이중분사식 수소기관에서 실린더헤드의 벽표면온도는 가솔린기관에서와 동일하게 배기밸브 브릿지부가 가장 높으나, 각 위치에 따른 벽표면온도는 가솔린 기관에 비해 최고 약 40K정도, 온도진폭도 약 2배정도 큰 값을 나타냈다.
3. 이중분사식 수소기관의 순간열유속 해석



결과, 순간열유속의 최대치는 가솔린 기관과 비교해 약 2.5배정도 큰 값을 나타냈다.

4. 상기와 같은 결과를 종합해 볼 때, 이중 분사식 수소기관은 분사천이영역에서 급격한 벽면온도의 변동이나 온도편차는 발생되지 않으나, 수소연료를 실린더내 직접 분사하는데 따른 공급열량의 증가로 열부하가 커지므로 이에 대한 대책이 필요함을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 에너지·자원 기술개발 사업의 일환으로 수행되었음을 알립니다.

## 참고문헌

1. Y. Y. Kim, J. B. Park, J. T. Lee, "A Study on Development of Hydrogen Fueled Engine with High Power and High Efficiency", The 4th Japan-Korea Joint Symposium '97 on Hydrogen Energy, PP.62-71, 1997.8.
2. 최한규, 김윤영, 이종태, "고효율 고성능의 이중분사식 수소기관 개발에 관한 연구(흡기관 분사영역 확장을 위한 역화억제의 검토)", 한국수소에너지학회 춘계학술대회 논문집, PP.107-116, 1999.5.
3. H. K. Choi, J. Y. Ahn, Y. Y. Kim, J. T. Lee, "A Basic Study on the Extension of External Injection Region in Hydrogen Fueled Engine with Dual Injection", KHES and HESS, The 5rd Korea-Japan Joint Symposium '99 on Hydrogen Energy, PP.237-248, 1999.11.
4. J. T. Lee, Y. Y. Kim, C. W. Lee, J. A. Caton, "An Investigation of a Cause of Backfire and its Control due to Crevice Volume in a Hydrogen Fueled Engine", ASME 2000 ICE Spring Technical Conference, ICE-Vol. 34-3, PP.1-8, 2000.4.
5. 조진우, 류영, 이종태, "DOHC 가솔린기관의 연소실 벽표면순간온도와 비정상열유속의 측정 및 해석(제1보:실린더헤드에 관한 연구)", 자동차공학회논문집, 제 7권 제 1호, pp.10~19, 99370002, 1999.