

직접분사식 수소연료의 분무 및 연소특성에 관한 연구

이 성 옥^{*1)} · 기 완 수²⁾

국민대학교 자동차전문대학원^{1,2)}

A Study on the Characteristics of Injection and Combustion with Directly Injected Hydrogen Fuel

Seang Wock Lee^{*1)} · Wan Soo Kee²⁾

¹⁾Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

²⁾Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 25 October 2006 / Accepted 7 May 2007)

Abstract : This study aims to provide a fundamental data for directly injected hydrogen fuel engines. Spray, ignition and combustion characteristics of hydrogen were studied using constant volume chamber. For spray visualization, hydrogen was vertically injected into a combustion chamber at various condition, for example, injection pressure, ambient pressure. And an argon laser was used for the shadowgraph photography by applying optical method. Also, to investigate heat-release rate and flame propagations, spark was ignited on hydrogen injected at the different time after injection and the duration of injection was also changed. Processes of ignition and combustion were analyzed by heat-release rate calculated by pressure history and were observed by shadowgraph photography. The results gave much knowledge of spray, ignition and combustion characteristics of hydrogen.

Key words : Hydrogen(수소), Direct-injection(직접분사), Spray(분사), Combustion(연소), Visualization(가시화), NOx(질소산화물)

1. 서론

수소연료는 연소시 NOx를 제외하고 발생하는 유해배기가스가 거의 없고 물의 전기분해로 제조된다면 매장량의 한계가 없다는 장점 때문에 현재 주목되고 있다. 더욱이 계속적인 유가 상승을 고려할 때 대체연료의 개발이 절실히 요구되고 있으며 현시점에서 수소 엔진의 개발은 하이브리드차와 연료전지차로 넘어가는 과도기에 중요한 중개자 역할을 할 수 있다. 수소연료는 넓은 가연한계, 저부하 영역에서의 효율 증대, 제로에 가까운 배출가스 그리고 연료자체의 고옥탄가에 의해 압축비를 증가시킬 수

있다는 장점 등이 있다. 그러나 넓은 가연한계와 가솔린의 3배정도에 가까운 빠른 연소 속도는 역화 및 조기착화의 문제점을 가지고 있으며 급격한 열방출에 의한 고온영역에서의 NOx 발생도 문제점으로 지적되고 있다.^{1,2)} 이러한 문제점들은 직접분사식 분사시스템의 채용과 EGR 또는 DeNOx 촉매 등의 사용에 의해 해결 가능하리라 여겨진다.³⁾ 수소연료에 고압직접분사방식을 채용할 경우 기존 엔진과 동등한 성능을 얻으면서 배출가스를 제로에 가까운 양으로 저감시킬 수 있는 장점을 가지고 있으며 최근 전자제어식 인젝터의 성능향상은 이를 가능하게 한다.

본 연구에서는, 수소엔진에서 연소 최적화 조건

*Corresponding author, E-mail: energy@kookmin.ac.kr

을 얻는 것을 목적으로 하여 분사압력 및 분사기간 등을 임의로 조정할 수 있는 정적연소기를 사용하여 연소압력에 기초한 해석과 새도우그래프 사진을 통해 화염관찰을 실시하였다. 이것으로부터 수소 비정상분류의 점화, 연소특성의 파악에 기초자료로 사용될 최적 분사 및 점화 조건을 확인하고 실험 결과를 바탕으로 향후 엔진 개발을 위한 기초적 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

2.1.1 실험기관

본 연구에서 사용되는 정적연소기와 주변장치 개략도를 그림 1에 정리하였다. 연소실은 높이 123mm, 폭 140mm(부피 약 1660cc)이고 주변부에는 흡기밸브, 배기밸브, 압력센서, 점화를 위한 전극, 수소분사 인젝터로 구성되어 있다. 또한, 연소기의 양쪽면은 직경 130mm의 강화유리를 설치하여 연소실 내를 관찰할 수 있도록 제작하였다.

2.1.2 장치구성

그림 2는 실험에 사용된 장치들을 보여주고 있다. 정적연소기를 중심으로 Ar레이저 광원과 광원의 출력조절을 위한 장치로 구성되어 있다. 분무 및 연소

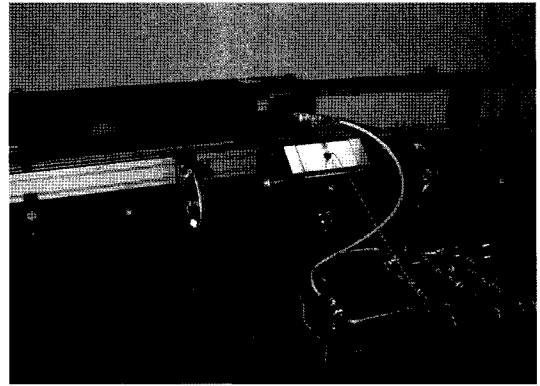


Fig. 2 Optical systems

계측을 위해 고속디지털카메라(Photorn FASTCAM 512)를 사용하였고 실험으로는 연소실내에 298K의 공기를 일정 압력으로 충분하게 유지시킨 상태에서 표 1에서 나타낸 각 조건에서 분사하여 분무, 연소 및 압력 데이터를 계측하였다. 연소압력 데이터는 LabVIEW를 기반으로 한 DAQ(Data Acquisition : DAQCard-6024E)를 사용하였으며, 파워트랜지스터와 텅스텐을 사용하여 점화점을 분류내에 위치시키고 전극의 간격은 1mm로 제작하였다. 모든 신호의 컨트롤은 ATMEL-ATMEGA32를 이용하여 Code-Vision AVR C언어를 사용하여 프로그램에 의해 제어하였다.

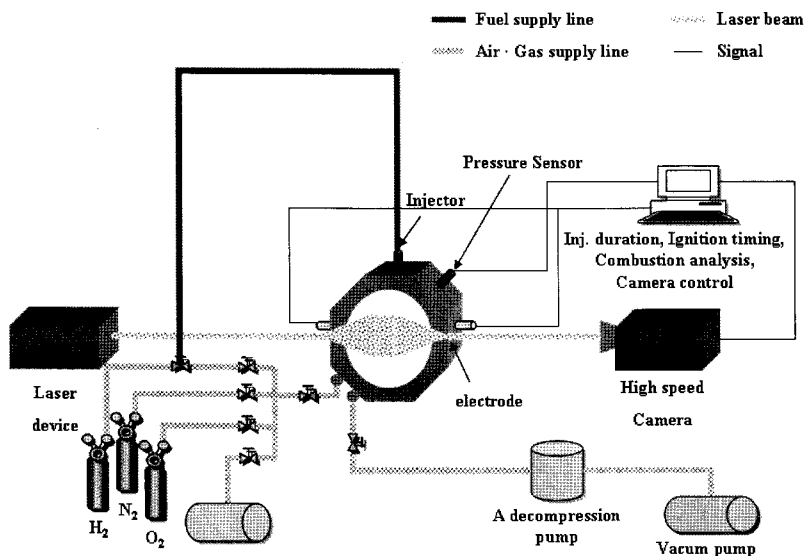


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

2.1.3 실험방법

본 연구에서 수행한 실험조건들을 표 1에서 보여 정리하였다. 수직으로 분사되는 연료는 중앙에 위치한 전극에서 점화를 시키고, 이 때 점화시기, 분사압력, 분위기압력 등을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 연소시 압력경과에 따른 열발생율을 구하고 웨도우그래프 촬영으로부터 분류 및 화염의 발달상황을 가시화하여 관찰했다. 가시화는 고속디지털카메라를 이용하였으며 촬영속도는 2,000fps의 조건으로 촬영하였다.

Table 1 Experimental condition

Fuel	Hydrogen (99.99%)
Ignition timing(Ti) [ms]	ASOI 3,6,10 /3,10,17
Inj. duration(Tj) [ms]	12, 20
Ambient pressure (Pa, gauge) [MPa]	0.5
Inj. pressure (Pj, gauge) [MPa]	1, 3, 5
Ignition position	The center of CVC
Nozzle diameter dN [mm]	0.6

* ASOI : After Start Of Injection

3. 결과 및 고찰

3.1 직접분사 수소연료의 분류 가시화

실험에서 사용된 분사압과 분위기 압력의 조건으로 분류의 연소기하단까지 도달시간을 그림 3에 나타내었다. 일정 분위기압 하에서 분사압을 증가시키면 분류속도가 빨라져 벽면으로의 도달시간이 짧아지는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 분사압력에 따른 계측결과에서 다음 조건(1MPa, 3MPa, 5MPa)으로 수소연료의 분류를 관찰하였다. 먼저 정적연소기의 분위기 압력은 0.5MPa

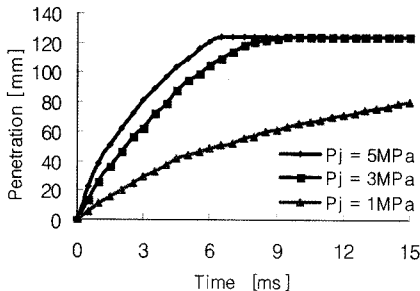


Fig. 3 Spray penetration for different injection pressure

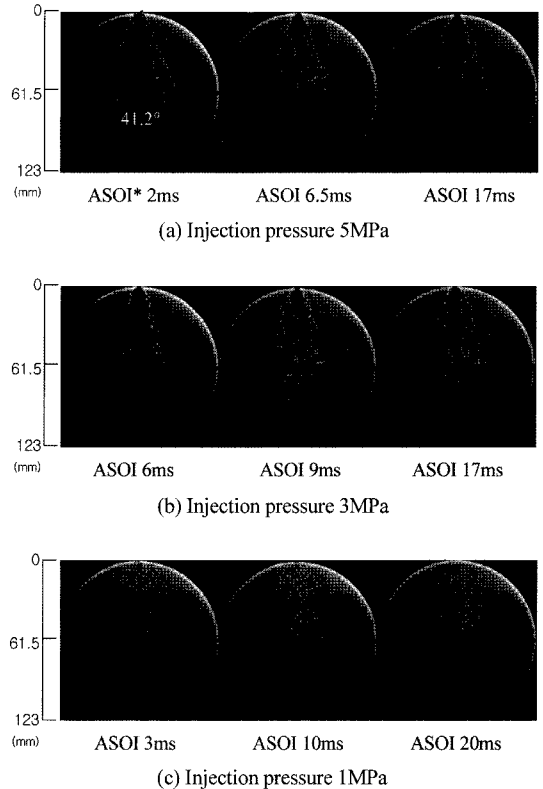


Fig. 4 Shadowgraph images of Hydrogen injection

로 고정 시키고 분사시간은 20ms로 고정시킨 상태에서 결과를 보여주고 있다.

$P_j=1MPa$ 에서는 낮은 분사압으로 인해 분류의 관통력이 떨어지고 이로 인해 분사속도도 느리게 되어 분사가 끝나는 20ms가 되어도 분류의 끝이 연소기의 하단에 도달하지 못한다. 그에 반해 $P_j=3MPa$, $5MPa$ 에서는 분류가 일정시간이 지나면 연소기 하단까지 도달하는 모습을 볼 수 있지만 두 압력의 차이에 따른 시간차이가 발생한다. 3MPa의 경우에는 6ms정도에 전극에 분류가 도달하고 5MPa의 경우에는 2ms에 도달한다.

3.2 직접분사 수소연료의 연소

3.2.1 가시화를 통한 연소특성

수소는 넓은 가연한계를 갖기 때문에 분류 중간에서도 안정적인 점화를 할 수 있다. 이러한 특징으로 인해 그림 5에서는 분류형태에서 얻은 분류도달시간에 따라 점화시기를 변경시켜가며 연소의 형태

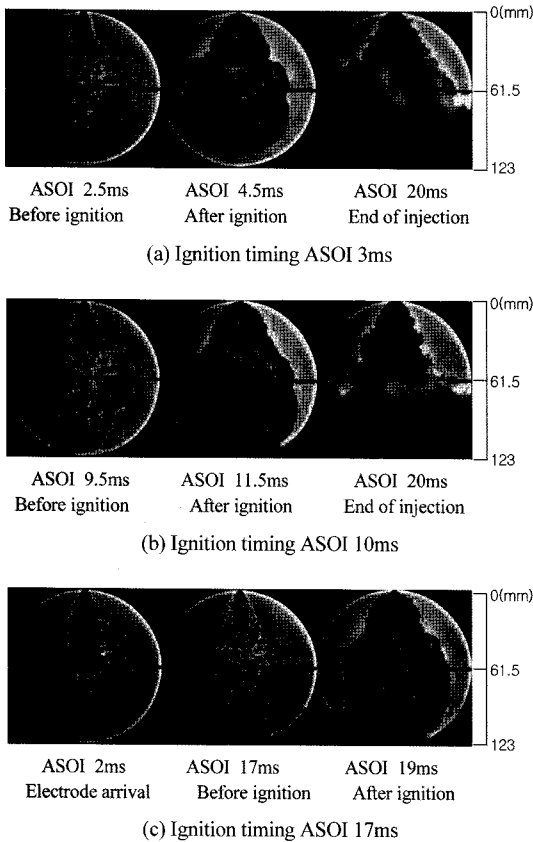


Fig. 5 Shadowgraph images of Hydrogen combustion

를 관찰하였다. 점화시기의 진·지각의 정도를 높이기 위하여 분사압은 5MPa로 고정하고, 분위기압력은 0.5MPa로 하였다. (a)에서는 분류가 전극에 도달함과 동시에 점화가 되고 수소의 빠른 연소특성에 의하여 분류를 타고 올라 연소가 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 이후 분사되는 연료는 분사됨과 동시에 연소가 되어 분사가 종료되는 20ms까지 확산연소가 이루어지게 된다. (b)의 경우에는 분류가 충분히 도달 후 점화시켜 (a)의 경우보다 연소실에 더 많은 연료가 존재하는 조건으로 급속한 예혼합 연소가 이루어지고 있다. (c)에서는 분사가 거의 끝나는 시점에 점화가 되어 가장 급속한 속도의 연소형태를 이루고 있으며 점화시기를 늦출수록 연소의 형태가 연소실의 하단부에서 이루어지는 것을 볼 수 있다.

3.2.2 압력·열발생율을 통한 연소특성

전술한 바와 같이 수소는 가연범위가 넓고 연소

속도가 빠른 특징을 가지고 있어 점화가 쉽게 이루어지고 점화시간의 조절에 따른 연소특성의 차이를 볼 수 있다.⁴⁾ 이를 압력데이터를 통해 열발생율을 확인하고 각 점화시기에 따른 연소의 특성을 얻었다.

(a) 12ms에서 점화시기변경에 따른 연소특성

그림 6은 분사시간을 12ms로 일정하게 하여 점화시기를 변경하면서 압력데이터를 얻고 그에 따른 열발생율을 구하였다. 점화시기가 ASOI 3ms일 때에는 소량의 연료가 연소실 내에서 빠른 연소를 하고 지속적인 분사에 의한 확산연소가 이루어진다. 순간적인 열발생율은 적으나 확산연소에 따른 열발생이 지속되고 분사가 끝나는 시점에 연소가 종료하게 된다. ASOI 6ms에서의 점화는 ASOI 3ms보다 더 많은 연료가 순간적으로 연소를 하고 이후 ASOI 6ms의 연소는 ASOI 3ms때의 점화와 비슷한 양의 최대 열발생율을 보인다. ASOI 10ms의 점화는 거의 분사 종료직전에 연소가 시작하여 분사가 끝남과 동시에 연소가 마무리된다. 한번에 연소가 이루어지기 때문에 열발생율의 최고점이 가장 크며 연소기간도 가장 짧음을 알 수 있다.

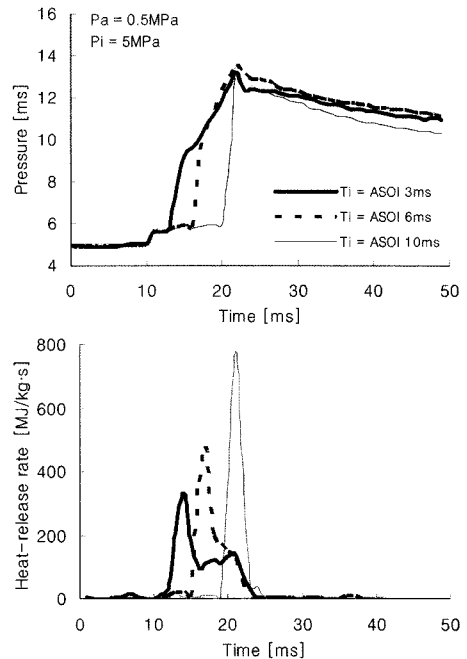


Fig. 6 History of pressure and heat-release rate for various ignition timing ($T_j = 12ms$)

(b) 20ms에서 점화시기변경에 따른 연소특성

분사시간을 20ms로 하여 실험을 한 결과를 그림 7에 나타내었다. 그 결과는 분사시간 12ms와 유사한 경향을 얻었으며 분사량의 증가에 따른 높은 압력과 열발생율을 볼 수 있었다. 12ms에서보다 점화시기의 지각시 압력이 상승되는 특징을 명확하게 확인할 수 있다. 점화시기를 지각 시킬수록 연소시의 최고압은 증가하였고 열발생율의 최대치 또한 증가하였다. 점화시기가 지각이 되서 급속한 연소와 높은 열발생율을 얻을 수 있지만 급격한 열방출에 의한 NOx가 다량 발생할 우려가 있다.

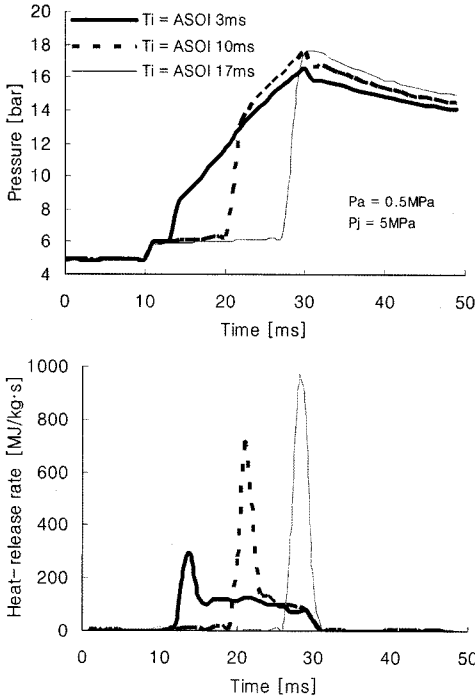
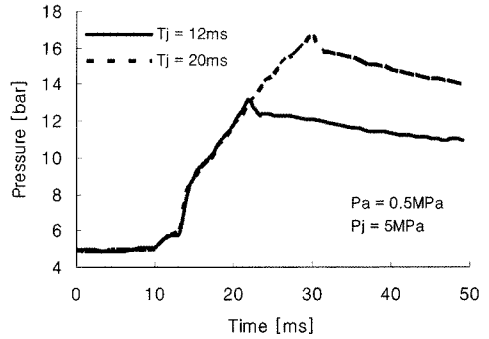


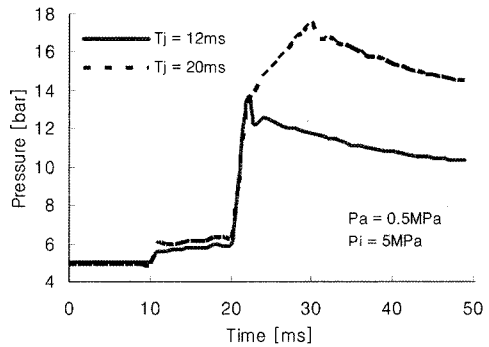
Fig. 7 History of pressure and heat-release rate for various ignition timing ($T_j = 20\text{ms}$)

3.3 분사기간에 따른 압력변화

분사량의 증가에 따른 압력 변화를 그림 8에 나타내었다. 분사량의 증가에도 불구하고 같은 점화시기에 점화를 하였을 경우, 압력은 점화직전까지의 분사량의 연소가 급격히 이루어지기 때문에 일정기간동안 같은 모양의 압력선도를 나타내고 있으며 분사량이 많은 경우, 분사가 종료될 때까지 확산연소에 의한 압력증가를 보인다. 또한 각각의 분사기



(a) Ignition timing ASOI 3ms



(b) Ignition timing ASOI 10ms

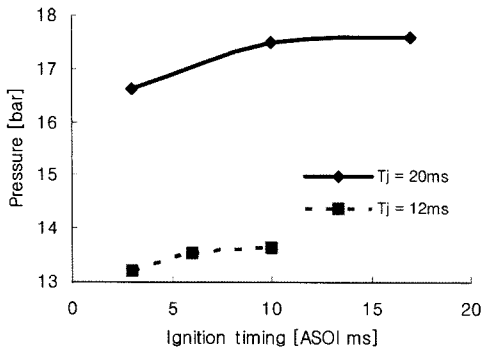
Fig. 8 History of pressure for various injection duration

간에 대해서 각 점화시기에 대한 최고압력과 최고 열방출율을 그림 9에 나타내었다. 점화시기(ASOI 3ms, 10ms)에서의 점화가 이루어지면 최고 열발생율은 비슷한 수치를 나타낸다. 이러한 경향을 통해서 분사시기의 조절에 따라서 연소특성의 변화를 알 수 있다.

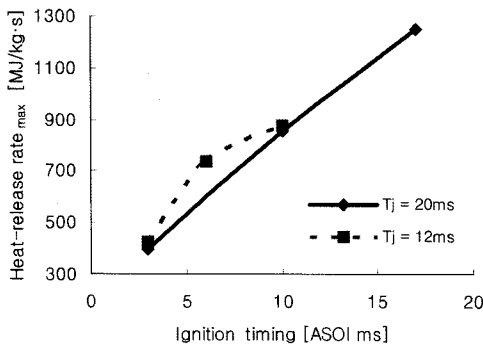
4. 결론

분사와 점화의 조건들을 변화시키면서 수소의 분무 및 연소특성을 정적연소기를 사용하여 측정한 결과 다음의 견해를 얻었다.

- 1) 분사압을 증가시킬수록 분류의 속도가 빨라지고 혼합기의 형성이 향상됨으로써 점화시기의 진·지각범위가 넓어졌다.
- 2) 고압의 연소실내에서 충분한 관통력을 갖기 위해서는 분사압을 5MPa이상으로 높일 필요가 있음을 확인하였다.



(a) Max pressure for ignition timing



(b) Max heat-release rate for ignition timing

Fig. 9 Max heat-release and Max pressure for various ignition timing

3) 수소는 넓은 가연한계범위를 가지고 있어 분사 기간 중에 점화가 안정적이고, 분사종료직전에

점화할 경우 연소속도가 급속히 증가함을 확인하였다.

4) 점화시기를 진각 시킬수록 연료의 예혼합 연소비율이 적어지며 확산연소 비율은 많아진다. 또한 점화시기를 지각 시킬수록 예혼합 연소비율이 많아져 급속한 연소와 큰 열발생율을 얻을 수 있지만 급격한 열방출에 의한 고온영역에서의 NOx가 다량 발생할 우려가 있다.

References

- 1) Y. Matsui, R. Kajiwara, A. Mohammadi and M. Shioji, "Study on the Characteristics of Ignition and Combustion in Hydrogen and Natural-Gas Unsteady Jets," JSAE 20055216, 2005.
- 2) B. S. Kim and C. H. Kwon, "Combustion Characteristics of Methane-Hydrogen-Air Premixture (I)," Journal of KSAE, Vol.3, No.3, pp.129-139, 1995.
- 3) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, 1988.
- 4) S. R. Turns, An Introduction to Combustion Concepts and Application, McGraw-Hill, New York, 1996.