

수소기관의 이상점화에 의한 역화발생

김윤영*, 류태호*, 이종태**

*성균관대학교 대학원, **성균관대학교 기계공학부

Backfire Occurrence by Abnormal Electric Discharge in Hydrogen Fueled Engine

Y. Y. Kim*, T. H. Ryu*, Jong T. Lee**

*Grad. School of Sungkyunkwan Univ.

** School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.
300 Chunchundong Jananku, Suwon, Gyeonggi-do, 440-746, Korea

ABSTRACT

Because of low flame ion density in hydrogen-air mixture, many residual electric energy could be existed in the ignition system of hydrogen engine. If these residual energy discharged abnormally during intake stroke, it may be the cause of backfire occurrence which is serious problem in development of hydrogen fueled engine but unsolved in spite of many concerned research on it.

In this study, the possibility of backfire occurrence by abnormal electric discharge and countermeasure of that were investigated by using the experimental single cylinder hydrogen fueled engine with two types of ignition system. The results show that abnormal electric discharge appeared in low load with low ion density and then results in back fire occurrence. It is also seen that countermeasure method installing larger earth resistance in high tension code is effective to control abnormal electric discharge.

주요기술용어 : Hydrogen fueled engine(수소기관), Backfire(역화), Abnormal electric discharge(이상방전), Residual energy in high tension code(점화케이블내의 잔류에너지)

1. 서 론

수소가스를 흡기관내에 공급하는 흡기관내 공급식 수소기관은 수소와 공기의 혼합기간 증가에

의해 열효율이 높으며, 기존기관의 연료계통만을 개조하여 쉽게 수소기관화할 수 있는 장점이 있다. 그러나 고부하 운전영역에서 역화가 발생되어 정상운전이 불가능한 치명적인 단점이 있다.

역화발생을 근본적으로 회피하고자 수소가스를 실린더내에 직접 공급하는 수소기관이 제시되고 있다¹⁻⁴⁾. 이 방식은 흡기관내에 수소공기 예혼합기가 존재하지 않으므로 역화발생은 없지만 압축과정 중에 연료를 분사하는데 따른 혼합을 저하에 기인하여 열효율이 상대적으로 낮다. 또한 고압분사밸브의 신뢰성 및 기밀성에 의해 실용화하는데 해결해야 할 문제가 많다. 따라서 수소기관의 실용화 측면에서는 역화발생을 억제하여 흡기관내 공급식 수소기관을 개발하는 것이 가장 유리한 방법이라 할 수 있다.

수소기관에서의 역화 발생원인은 아직 명확하지 않지만 연소실내의 모종의 착화원에 의하여 조기착화가 일어나고 이것이 점차로 진전되어 수소의 빠른 연소속도에 의해 화염이 흡기관내로 역류하는데 기인하는 것이라 생각되고 있다^{5,6)}. 일반적으로 고부하 운전시 배기밸브 및 점화플러그 등의 선단은 고온이므로 이 부분의 열점들이 역화의 착화원이 될 수 있다. 그러나 역화가 냉시동 시나 매우 희박한 공기연료비에서 종종 관측되는 것을 보면 열점 외에 다른 역화발생 원인이 있을 수 있다. 저자들은 수소의 소염거리가 좁은 특성을 고려하여 연소실내의 crevice volume내 혼합기가 역화발생의 원인이 될 수 있

다는 것을 밝혔으나 역화한계당량비의 확장에 한계가 있었다⁷⁻¹⁵⁾.

수소기관의 점화장치는 통상 스파크 점화방식을 채택하고 있다. 스파크점화는 2차코일에서 유도된 고전압의 방전을 통해 이뤄진다. 이때 고전압의 전하는 화염내의 이온전류의 형태로 방출된다¹⁶⁻¹⁸⁾. 수소연료는 탄화수소계 연료에 비해 분자조성이 간단하여 화염내에 생성되는 이온량은 매우 작다¹⁹⁾. 이로 인해 수소연료를 스파크 점화시킨 경우 점화장치에서 발생된 고전압의 전하가 쉽게 방출되지 못하는 특성을 갖고 있다. 현재 개발중인 수소기관의 점화장치는 가솔린 기관용 점화장치를 별도의 개조없이 그대로 사용하고 있다. 그러므로 수소기관에서 사용되는 점화케이블 등에는 고전압의 전하가 상당 부분 잔류할 수 있는 가능성이 있다고 보고되고 있다²⁰⁾. 만약 이러한 잔류에너지가 흡기과정 중에 이상방전되면 연소실내로 유입되는 신기를 착화시켜 역화발생의 원인이 될 수 있다.

본 연구에서는 수소기관의 역화발생 억제 연구의 일환으로서 스파크 점화장치에서의 잔류 점화에너지의 이상방전과 이로 인한 역화발생의 가능성을 확인하였다. 또한 점화시스템내의 잔류전하를 방출시켜 이상점화를 억제시키는 방안

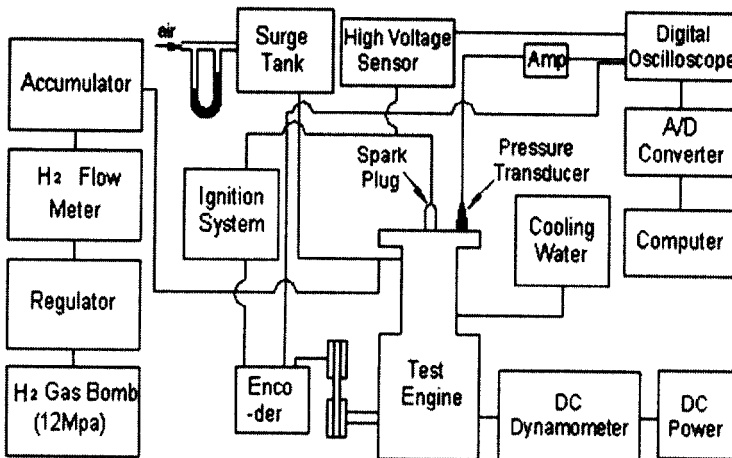


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

Fig. 2. The hydrogen fueled DOHC single cylinder research engine ; $V_s = 500\text{cc}$, $\epsilon = 9$.

검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 전체적인 구성을 나타낸다. 실험장치는 수소기관, 흡배기계통, 수소가스 공급계통, 동력측정장치와 각부의 온도 및 압력 측정장치로 구성된다. 수소기관은 압축비 9.2, 행정체적 500cc의 흡기관 공급식 DOHC 단기통 수소기관이다. 이 기관은 상용 가솔린 FED 엔진의 주요부품을 사용하여 제작하였으며, Fig. 2에 실험사진을 나타낸다.

수소가스는 고압수소 펌프로 부터 1, 2차 감압

기를 거쳐 1.5bar의 일정압력으로 감압되어 흡기관내에 연속적으로 공급된다. 흡기관내로 공급되는 수소가스량은 흡기관 전방에 설치되어 있는 미세 니들밸브로 조절한다. 수소 및 공기량은 각각 열전대식 수소유량계(Brookhorst F-113AC)와 Lamina flow-meter (Merium 50MH10)로 측정한다. 냉각수는 직수를 공급하며 실린더헤드와 블럭에 독립적인 입출구를 갖도록 하였다.

고압케이블 및 점화코일내의 잔류 에너지량은 점화코일 형태에 따라 다를 수 있다. 따라서 점화장치의 이상방전 유무는 Fig. 3과 같이 2차코일이 어스측에 연결된 통상의 distributor 점화방식에서 사용되는 점화코일과 2차측이 어스측에 연결되어 있지 않은 DLI 점화방식의 점화코일에 대해서 파악하였다. 상기와 같은 점화코일을 각각 distributor방식과 DLI방식의 점화코일이라 칭한다.

점화장치의 단속기는 자기검출에 의해 작동되는 full transistor 방식을 사용하였다. 이상방전의 유무와 방전특성을 조사하기 위하여 점화케이블에 고전압센서를 설치하였다. 그리고 점화파형은 digital 오실로스코프(150MHz)에 저장하였다. 연소실내 압력은 piezo 타입의 압력변환기(Kistler 6001A)로 측정하였다. 상기 실험에서 기관회전수는 2000rpm, 냉각수 온도는 80℃로 고정하였다.

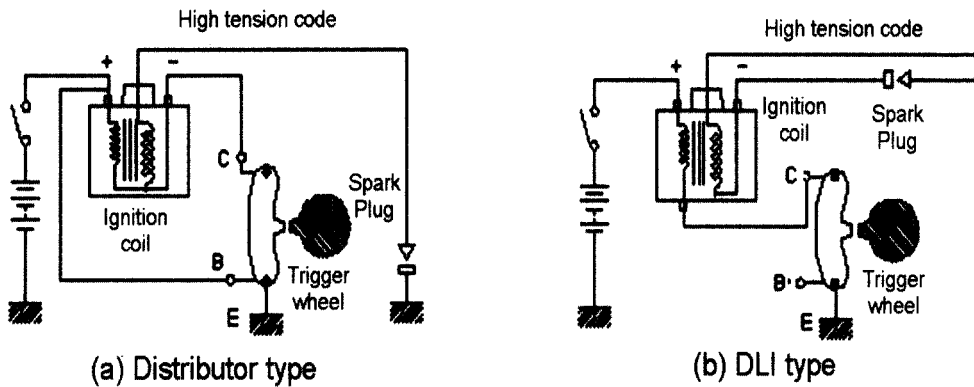


Fig. 3. Ignition coils of distributor and DLI type.

(a) Gasoline

(b) Hydrogen

Fig. 4. Comparison of spark waveform with gasoline and hydrogen.

3. 이상방전과 역화발생

3.1 가솔린 및 수소연료에 대한 방전 특성 비교

가솔린 연료와 수소연료에 대한 점화장치의 방전특성을 파악하고자 Fig. 4에 각각의 연료에 대한 점화에너지의 방전파형을 나타낸다. 여기서 점화코일은 distributor타입을 사용하였으며, 기 관부하는 1/2 load, 점화시기는 MBT이다.

그림에 나타난 바와 같이 스파크 점화장치의 에너지 방출파형은 두 경우 모두 큰 전류가 순간적으로 흐르는 용량성분과 비교적 적은 에너지가 길게 흐르는 유도성분이 존재함을 나타낸다. 가솔린 연료를 사용한 경우의 스파크점화 전압파형은 용량성분과 유도성분이 명백히 구분되고, 방전 후 전압이 지속적으로 감소되는 파형을 보이고 있다. 그러나, 수소연료를 사용한 경우는 방전기간이 매우 짧으며, 방전 후 전압변동이 현저히 크고 지속적인 것을 나타낸다. 이것은 가솔린연료의 경우 점화에너지를 방전한 이후에 스파크 플러그 갭사이의 전압차가 급격히 상쇄되지만 수소연료의 경우는 정상방전 이후에도 스파크 플러그 갭사이에 높은 전위차가 존재함을 의미하는 것이다.

수소연료를 사용하는 경우 스파크 점화시 잔류

전압이 크게 나타나는 것은 화염내의 이온생성량의 차이에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 가솔린은 연소시에 H_3O^+ , CHO^+ , $C_3H_3^+$ 등의 이온이 다량 생성된다. 이 중에서도 H_3O^+ 및 $C_3H_3^+$ 이온들은 잔류시간이 길어 2차 코일에서 유도된 고전압 전하가 이온전류의 형태로 쉽게 방출된다. 이에 반해 수소의 경우는 화염내에 생성되는 이온이 H^+ 로 단순하여 이온농도가 매우 낮아 전하방출이 어렵게 된다.

따라서, 수소기관에서는 가솔린기관의 경우와 다르게 고전압 케이블 등에 높은 에너지의 잔류 전하가 많이 축적될 수 있다. 이로 인하여 중심전극과 집지전극사이의 에어갭 저항이 낮은 흡배기 과정 중에 축적된 잔류에너지가 방전될 가능성이 존재함을 예측할 수 있다. .

3.2 이상방전에 의한 역화발생

수소기관에서의 이상방전에 의한 역화발생을 확인하기 위하여 먼저 역화가 발생하는 당량비를 distributor방식과 DLI방식의 점화코일에 대해 파악하였으며, Fig. 5에 그 결과를 나타낸다.

역화는 두 종류의 점화코일 모두 연료공기당량비가 대체로 $\phi = 0.9$ 이상인 고부하 운전영역에서 발생하는 것을 보이고 있다. 이것은 통상 수소의 높은 발열량에 의한 열점이나 crevice volume

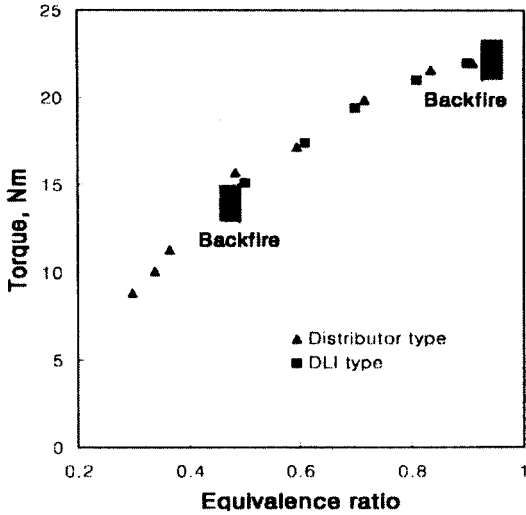


Fig. 5. Backfire occurrence in cases with ignition coils of distributor and DLI types.

Fig. 7. Backfire occurrence with abnormal ignition.

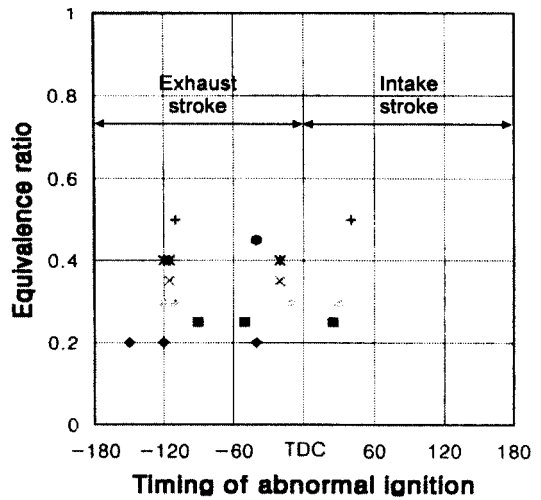


Fig. 8. Fuel-air equivalence ratio and timing occurred abnormal discharge.

Fig. 6. Backfire occurrence without abnormal electric discharge.

등에 기인하는 것으로 추정되는 역화발생 시점과 동일하다. 고부하 운전영역에서 점화장치의 이상 방전에 의한 역화발생 원인이 있는가 파악하고자 역화가 발생하는 시점에서의 점화파형을 조사하였으나 Fig. 6과 같이 이상점화 파형은 관찰되지 않았다. 따라서 당량비가 약 $\phi=0.9$ 이상인 고부하 운전영역에서 발생한 역화발생은 이상방전외

의 다른 원인에 기인하는 것으로 판단하였다.

저부하 운전영역에서는 역화가 distributor 방식의 점화코일을 사용한 경우 발생되지 않으나 DLI방식을 사용한 경우 발생하는 것을 나타낸다. 저부하 운전영역은 공급열량이 작아 연소실내의 온도가 낮으므로 열점이나 crevice 원인설로 상기의 역화발생 현상을 설명하기 어렵다. 따라서 DLI방식의 점화코일을 사용한 경우 저부하 운전영역에서 역화가 발생하는 것은 스파크점화장치의 이상점화에 기인할 가능성이 높다.

이를 확인하기 위하여 DLI방식의 점화코일을 사용한 경우에 대한 저부하 운전영역에서의 실린더내 압력 및 점화파형을 파악하였으며 이 결과를 Fig. 7에 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 정상점화 후 이상방전 파형이 관찰되며 이로 인해 흡입과정중의 신기가 착화되어 역화가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 수소의 작은 이온화 경향에 의해 정상점화 이후에도 고전압이 잔류하고 이러한 잔류에너지가 연소실내 에어갭 저항이 낮은 흡입과정 중에 방전되는데 기인하는 것이라 생각된다.

상기와 같이 각 점화코일의 방식에 따라 이상방전 발생여부가 상이한 것은 잔류전하의 방출량의 차이에 기인하는 것으로 생각된다. 즉, distributor방식의 경우는 Fig. 3(a)와 같이 2차코일이 어스되어 잔류전하가 비교적 쉽게 외부로 방출된다. 그러나 Fig. 3(b)의 DLI방식의 경우는 어스측과 분리된 2차코일이 고전압케이블 및 스파크플러그와 함께 폐회로를 이루어 잔류전하가 잔존하게 되는 것이라 생각된다.

Fig. 8은 이상방전이 발생하는 시기와 그 때 공급되는 혼합기의 당량비를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 희박혼합기의 경우는 농후혼합기에 비해 화염내 H⁺ 이온의 생성량 자체가 감소되어 잔류에너지량이 증대된다. 따라서 이상방전은 당량비가 약 $\phi=0.5$ 이하인 희박영역에서 모두 발생하는 것을 나타낸다.

그리고 이상방전의 발생시기는 연소실내의 가스압력이 낮은 시점, 즉 에어갭 저항이 작은 흡배기과정 중에 발생되며, 각 당량비에 대해 발생시기가 불규칙적인 것을 보이고 있다. 이와 같이 발생시기가 불규칙적인 것은 스파크플러그 갭사이의 방전에 영향을 미치는 고압케이블내의 잔존에너지량과 연소실내 절연과피 요구전압 등이 항상 일정하지 않은데 기인하는 것이라 생각된다.

일반적으로 방전전압에 영향을 주는 에어갭의 저항은 연소실내의 가스압력 및 온도에 영향을 받으므로 점화시기가 잔류에너지에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 점화시기에 대한 이상방전 발생

Spark timing

Fig. 9. Back fire limit equivalence ratio at each spark timing.

관계를 파악하였다. Fig. 9는 점화시기를 변화시킨 경우 저부하 운전영역에서의 역화한계당량비를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 점화시기를 MBT에서 $\pm 10^\circ$ 범위로 진각 및 지각시켰지만 이상방전이 발생하는 역화한계당량비는 거의 일정한 것을 보이고 있다. 이러한 결과는 점화시스템내의 잔류전하에 미치는 점화시기의 영향이 미미하다는 것을 나타내는 것이다.

4. 이상점화 억제방안

Distributor방식의 점화코일을 사용한 경우 이상방전이 발생되지 않는 것은 2차코일이 어스측과 연결되어 정상점화 후의 잔류에너지가 어스측으로 쉽게 방출되기 때문이라 생각된다. 이것을 고려하면 DLI방식에서도 점화케이블에 어스저항을 통해 잔류전하의 방출을 촉진시키는 경우 이상방전의 발생을 억제할 수 있을 것이다.

이 개념을 바탕으로 Fig. 10과 같이 DLI 점화장치의 점화케이블에 가변저항을 어스측과 직결한 이상점화 억제방안을 강구하였다. 이때 어스저항은 점화케이블에 잔류된 전하량을 최소화하기 위해 점화플러그 부분에 근접시켜 설치하였다.

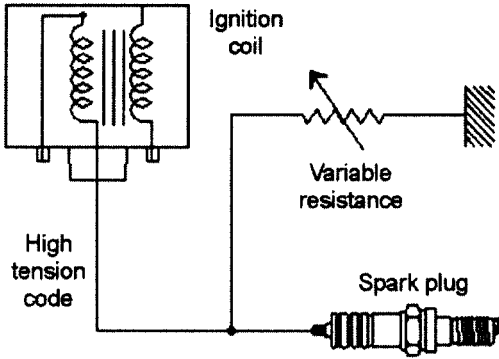


Fig. 10. Schematic diagram of DLI type ignition system installed variable resistance in high tension code.

Fig. 12. Spark waveform with 4MΩ of earth resistance.

저항은 4MΩ으로 결정하였다.

Fig. 12는 점화케이블에 4MΩ 어스저항을 설치하여 당량비 $\phi=0.5$ 에서 수소기관을 운전시킨 경우의 점화파형을 나타낸 것이다. 유도방전 이후의 잔류전압은 어스를 하지 않은 경우의 Fig. 4(b)와 비교할 때 상당히 감소되는 것을 나타낸다. 따라서 점화케이블에 저항으로 어스시키는 방식은 점화성능에 영향을 주지 않으면서 이상방전의 억제에 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 상기의 점화장치를 사용하여도 당량비가 약 $\phi=0.9$ 근방의 고부하 운전영역에서 역화가 발생되는 것이 보여졌다.

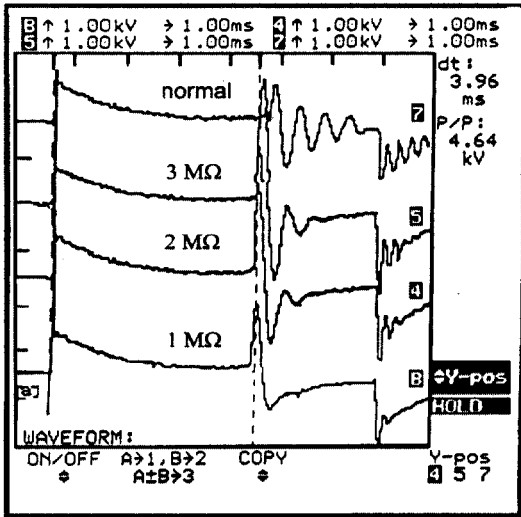


Fig. 11. Spark waveform as a function of resistance value.

어스저항의 최적치와 점화성능에 미치는 영향을 파악하고자 대기중에서의 각 저항값에 대한 점화파형을 비교한 것이 Fig. 11이다. 잔류전압의 크기는 어스가 있는 경우 저항치가 다르더라도 모두 감소하지만 스파크 및 아크방전의 크기와 기간은 어스저항을 설치하지 않았을 경우와 동일하다. 그리고 어스 저항값이 작을수록 잔류전압의 평활도가 크지만 어스저항값이 플러그 갭 저항보다 작을 경우 실화될 우려가 있으므로 어스

5. 결 론

흡기관내 공급식 수소기관에서 스파크점화 장치의 이상점화에 의한 역화발생의 가능성과 그 방지책을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) DLI 점화장치를 사용한 경우 이상방전에 의한 역화발생이 확인되었으며, 이것은 연소실내의 가스압력이 낮아져 스파크 플러그의 에어갭 저항이 작아졌을 때 점화시스템내에 잔류해 있던 점화에너지가 이상방전하는데 기인하는 것이라 생각된다.
- 2) 이상방전이 발생하는 시기 및 당량비는 불

규칙하지만 대부분 저부하 운전영역과 연소실내 에어갭 저항이 낮은 배기과정 또는 흡입과정 중에 발생되었다. 그러나 이상방전은 점화시기에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

- 3) 또한, 점화케이블에 어스저항을 연결시켜 점화시스템내의 잔류에너지의 외부방출을 촉진시킬 경우 점화성능에는 영향을 미치지 않으면서 이상방전 억제에 효과가 있음이 보여졌다.
- 4) 그러나, 상기 점화장치를 사용하여도 연료-공기 당량비 $\phi=0.9$ 근방의 고부하 운전영역에서 역화가 발생되며, 이것은 이상방전이 외에 또 다른 역화발생원인이 존재함을 의미하는 것이다. 따라서 고성능 수소기관의 실용화를 위해서 추후 고부하 운전영역에서의 역화발생의 원인 규명 및 방지책 마련을 위한 다방면의 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 에너지자원 기술개발지원센터의 지원하의 대체에너지 기술개발사업의 일환으로 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- 1) 이종태 : "수소기관의 개발현황 및 특성", 한국자동차공학회지, Vol. 18, No. 2, 1996, pp. 29-52
- 2) J. M. Kim, Y. T. Kim, J. T. Lee and S. Y. Lee : "Performance Characteristics of Hydrogen-Fueled Engine with the Direct Injection and Spark Ignition System", SAE Technical paper No. 952488, 1995, pp. 162-175.
- 3) S. Furuhashi : "Combustion Improvement in a Hydrogen Fueled Engine", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 2, 1977, pp.

329-337.

- 4) J. M. Kim, J. T. Lee, S. Y. Lee : "Combustion Characteristics of Hydrogen Fueled Engine with the Direct System", FISTA, Technical paper, 1996, pp. 58.
- 5) F. E. Lynch : "Backfire Control Techniques for Hydrogen Fueled Internal Combustion Engines", Proceedings of Hydrogen Energy, Part B, pp. 686-696
- 6) 이종태 : "수소엔진 및 수소자동차에 관한 연구", 한국수소에너지학회 춘계학술대회 초록집, 1997, pp. 8-56.
- 7) 백성호, 이종태 : "흡기관분사식 수소기관의 특성 및 역화한계당량비 해석", 한국수소에너지학회지, Vol. 7, No. 1, 1996, pp. 55-62.
- 8) J. T. Lee, Y. Y. Kim, C. W. Lee, and J. A. Caton : "An Investigation of a Cause of Backfire and Its Control Due to Crevice Volumes in a Hydrogen Fueled Engine", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 123, 2001, pp. 204-210.
- 9) 이창욱, 오태석, 김윤영, 이종태 : "수소기관의 역화발생에 미치는 crevice volume의 영향에 관한 연구", 대한기계학회 추계학술대회논문집Ⅱ, 1996, pp. 646-651.
- 10) 이창욱, 류태호, 김윤영, 이종태 : "다점점화에 의한 수소기관의 역화한계당량비 확장에 관한 검토", 한국수소에너지학회 추계학술대회초록집, 1996, pp. 64-71.
- 11) 백성호, 박재범, 김윤영, 이종태 : "수소기관의 역화한계당량비 확장에 관한 연구", 수소에너지, Vol. 8, No. 3, 1998, pp. 111-119.
- 12) 이창욱, 오태석, 김윤영, 이종태 : "Piston top land부의 crevice volume의 크기가 역화한계에 미치는 영향", 한국수소에너지학회 춘계학술대회초록집, 1996, pp. 44-49.
- 13) 최한규, 김윤영, 이종태 : "고효율, 고성능의 이중분사식 수소기관 개발에 관한 연구

- (흡기관 분사영역의 확장을 위한 역화 억제
의 검토)”, 한국수소에너지학회 춘계학술대
회초록집, 1995, pp. 107-116.
- 14) H. K. Choi, J. Y. Ahn, Y. Y. Kim, and J.
T. Lee : "A Basic Study on the
Extension of External Injection Region in
Hydrogen Fueled Engine with Dual
Injection", KHES and HESS, The 5th
Korea-Japan Joint Symposium on
Hydrogen Energy, 1999.
- 15) 김윤영, 이창욱, 이종태 : " Blow-by가스가
수소기관의 역화발생에 미치는 영향", 한국
자동차공학회 춘계학술대회논문집Ⅱ, 1997,
pp. 111-119.
- 16) S. Miyata, Y. Ito, and Y. Shimasaki :
"Flame Ion Density Measurement Using
Spark Ignition Engine", SAE Technical
paper No. 861528, 1986.
- 17) B. H. Dwiggins and E. F. Mahony :
"Automotive Electricity And Electronics",
Prentice Hall, pp. 253-261.
- 18) H. Heisler : "Advanced Engine
Techno-logy", SAE Technical book, pp.
442-502.
- 19) Y. Shimasaki, M. Kanehiro, S. Baba, S.
Maruyama, T. Hisaki, and S. Miyata,
"Spark Plug Voltage Analysis for
Monitoring Combustion in an Internal
Combustion Engine", SAE Tchnical paper
No. 930416, 1993..
- 20) T. Kondo, M. Hiruma, and S. Furuhami:
"A Study on The Mechanism of Backfire
in External Mixture Formation Hydrogen
Engines", Proceedings of WHEC vol. 3,
1996.