

밸브오버랩기간 변화에 의한 흡기관 분사식 수소기관의 역화억제에 관한 연구

강준경[†], Huynh Thanh Cong^{*}, 노기철^{**}, 이종태^{**}

A Study of Backfire Control in a Hydrogen-Fueled Engine with External Mixture Using Changes of Valve Overlap Period

J. K. Kang[†], T. C. Huynh^{*}, K. C. Noh^{*} and J. T. Lee^{**}

Key Words: Hydrogen-fueled engine with external mixture(흡기관 분사식 수소기관), Backfire control(역화억제), Valve overlap period(밸브오버랩기간), Mechanical continuous variable valve timing(기계식 연속 가변 밸브 타이밍)

Abstract

To analyze the influence of valve overlap period on a backfire occurrence, the single cylinder research engine with MCVVT(Mechanical Continuous Variable Valve Timing) system is developed and backfire limit equivalence ratio defined as fuel-air ratio equivalence ratio at which backfire occurs is examined according to various valve overlap period. The MCVVT is the system to control valve overlap period by mechanical device.

It is estimated that the lower valve overlap period has the higher backfire limit equivalence ratio though the same energy is supplied. When the valve overlap period is changed from 30° CA to 0° CA, backfire limit equivalence ratio is increased 74%, approximately. It means that valve overlap period is concern in backfire occurrence, and may be one of the methods for controlling back fire occurred in a H₂ engine.

1. 서 론

현재 개발되고 있는 수소기관은 수소연료 공급 방식에 따라서 흡기관 분사식과 실린더 내 직접 분사식으로 나눌 수 있다.⁽¹⁻³⁾ 수소가스를 흡기관 내에 공급하는 흡기관 분사방식은 열효율이 높으며, 기존기관의 연료계통만을 개조하여 쉽게 수소기관화 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방식은 수소의 큰 비체적에 기인하여 출력이 감소

하고 특히, 고부하 운전영역에서 역화가 발생되어 정상운전이 어려운 단점이 있다. 반면에 실린더 내에 직접 수소를 공급하는 직접 분사식방식은 흡기관내에 수소공기 예혼합기가 존재하지 않으므로 역화발생을 근본적으로 회피할 수 있다. 그렇지만 압축과정 중에 연료를 분사하는데 따른 혼합을 저하로 열효율이 상대적으로 낮다. 또한 고압분사밸브의 신뢰성 및 기밀성 등 실용화하는데 해결해야 할 문제가 많다. 따라서 수소기관의 실용화 측면에서는 역화발생의 억제가 가능하면 흡기관 분사식 수소기관을 개발하는 것이 더 유리한 방법이라 할 수 있다.

수소기관에서의 역화발생원인은 아직 명확하지 않지만 연소실내의 모종의 착화원에 의하여 조기 착화가 일어나고 이것이 점차로 진전되어 수소의 빠른 연소속도에 의해 밸브오버랩기간 중 화염이

† 주저자, 성균관대학교 대학원

E-mail : phantomzwei@naver.com

TEL : (031)290-7472 FAX : (031)299-4754

* 성균관대학교 대학원

** 성균관대학교 기계공학부

흡기관내로 역류하는데 기인하는 것이라 보고되고 있다. 이를 근거로 그동안의 역화억제는 모종의 착화원 및 빠른 연소속도를 저감시키기 위해 연소실 냉각 및 희박혼합기 등의 사용을 시도하였으나 한계가 있었다. 전술한 바와 같이 역화는 모종의 역화원, 빠른 연소속도 및 밸브오버랩기간에 의한 것으로 볼 수 있다. 만일 연소실내에 조기착화 된 빠른 연소속도의 화염이 있을지라도 밸브오버랩기간이 짧으면 착화된 화염이 흡기관으로 역류될 수 없게 된다. 따라서 밸브오버랩기간의 변화로 역화억제가 가능할 것으로 생각되나 이에 대한 것은 아직 명확히 체계적으로 해석되지 않은 것이 많다.⁽⁴⁻⁸⁾

저자들은 밸브 오버랩기간의 변화에 의한 역화억제의 가능성을 상세히 밝히기 위해 먼저 발화운전 중 흡배기밸브의 개폐시기를 연속적으로 변화시킬 수 있는 기계식 연속 가변 밸브시스템(MCVVT: Mechanical Continuous Variable Valve Timing)이 장착된 연구용 단기통 수소기관을 개발하고 이에 대한 기본성능 등을 해석한 바 있다.⁽⁹⁻¹⁰⁾

본 연구에서는 밸브오버랩기간의 감소에 의한 역화발생 억제 가능성을 밝히기 위한 일환으로 상기의 연구용 수소기관을 사용하여 측정된 밸브오버랩기간의 변화에 따른 역화발생의 유무와 제반성능을 바탕으로 그 가능성을 해석하였다.

2. 실험장치 및 방법

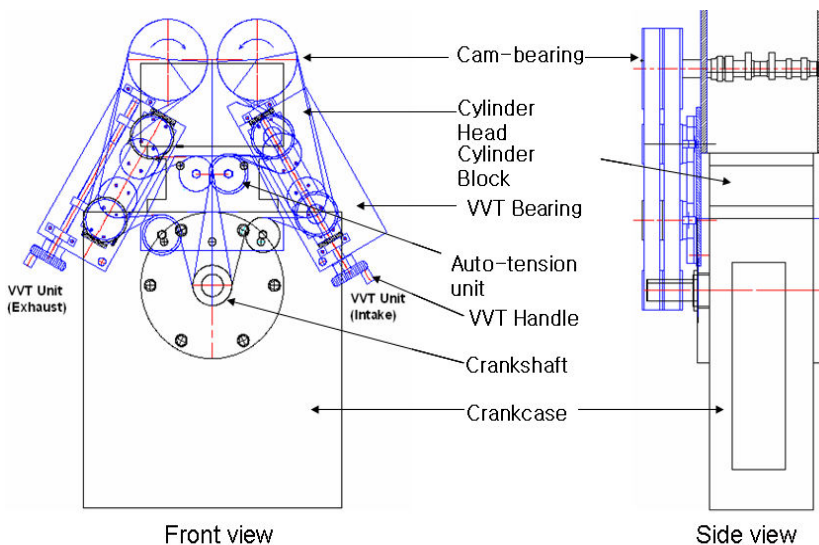


Fig. 1 Schematic diagram and photograph of experimental hydrogen fueled engine with MCVVT system

Fig. 1은 MCVVT 시스템을 장착한 실험용 흡기관 분사식 수소기관의 개략 및 실물사진을 나타낸 것이다.

실험용 수소기관은 보어 및 스트로크가 각각 86mm이며 커넥팅 로드 길이는 149.25mm, 압축비 $\epsilon=10.5$ 인 배기량 499.5cc의 DOHC 단기통 기관이다. 기관의 밸브오버랩기간은 MCVVT시스템의 축의 움직임을 흡입 및 배기 캠축에 각각 구동 벨트로 연결하여 흡배기 밸브 캠의 위상각 변화로 독립적이고 연속적으로 변화시킬 수 있다.⁽⁹⁾

Fig. 2는 전체적인 실험장치의 개략을 나타낸다. 실험장치는 전술한 연구용 단기통 수소기관, 기관 동력계, 연료공급장치, 유량측정장치, 공기 유량측정장치, 연소실 압력측정 장치 및 냉각장치 등으로 구성된다.

수소연료는 150bar의 고압 봄베에서 공급되어 압력조절기에서 10bar의 일정한 압력으로 1차 감압된 후 필터와 수소유량계를 거쳐 저압 조절기에서 3bar로 2차 감압되어 어큐물레이터를 거쳐 기관으로 공급된다. 수소연료 공급량은 인젝션 컨트롤러를 통하여 조절되며 열전대식 유량계(Bronchus, P-113AC-HAD-55-V)로 측정하였다. 기관의 냉각에는 직수를 사용하였고 실린더 헤드 및 블록에 독립적으로 공급된다.

실험변수는 밸브 오버랩 기간이다. 밸브오버랩기간(Valve Overlap Period : 추후 VOP라 칭함)은 배기 밸브 타이밍 단함시기를 ATDC 10°CA로 고정시키고 흡기밸브 열림시기를 조절하여 밸브오

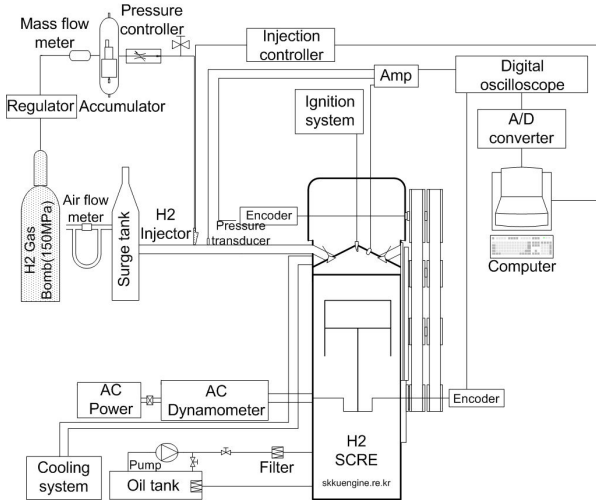


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

버랩기간을 50°CA에서 0°CA까지 10°CA간격으로 조정하였다. 밸브오버랩기간을 감소시키면 체적효율이 감소하므로 공급열량을 동일하게 한 경우의 실험도 수행하였다. 밸브오버랩기간은 배기밸브 타이밍을 고정하고 흡기밸브 타이밍만을 조절하여 변화시켰다. 각 실험변수에 대해 기관회전수는 1600rpm, 점화시기는 MBT, 그리고 부하는 WOT와 85% 부하로 고정시켰다.

Fig. 3은 흡기관분사식 수소기관의 역화발생을 파악하기 위한 것으로 역화발생 시 연소실 및 흡기관내의 압력을 나타낸 일레이다

그림에서 첫 번째 파형은 정상연소 시의 일반적인 연소압력 파형이다. 두 번째 파형은 역화발

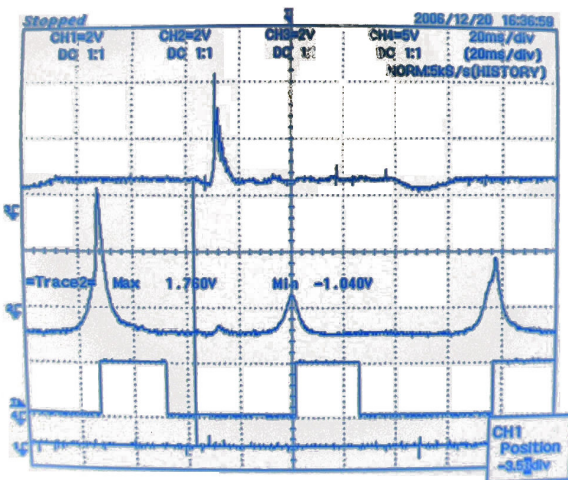


Fig. 3 Cylinder pressure and inlet port pressure at back fire

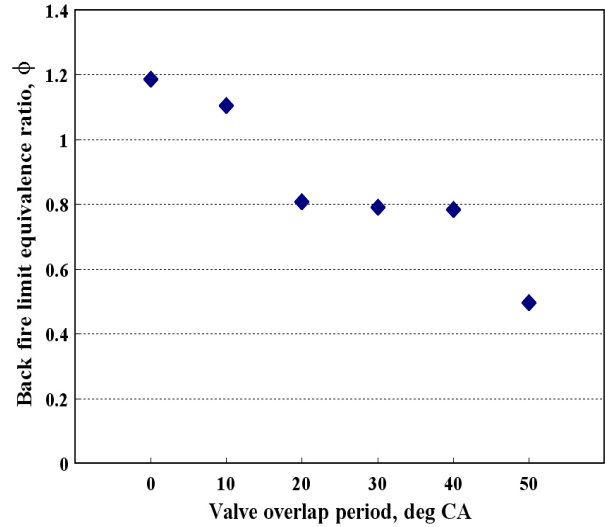


Fig. 4 Backfire limit equivalence ratio versus valve overlap period

생 시 연소실내 압력으로 역화가 발생된 후 연소된 가스가 흡입되어 모터링 시와 비슷한 압력을 나타내고 있다. 마지막 파형은 역화발생 시 흡기관내의 압력파형을 나타내는 것으로 상기 결과와 역화소음으로부터 역화발생여부를 판단하였다.

3. 실험결과 및 해석

3.1 밸브오버랩기간의 변화에 따른 역화현상

Fig. 4는 흡기관분사식 수소기관의 밸브오버랩기간을 변화시킨 경우의 역화한계 당량비를 나타낸 것이다. 여기서, 역화한계 당량비는 역화가 발생할 때의 농후영역의 연료공기당량비로 정의하였다.

그림에서 보는 바와 같이 밸브오버랩기간이 감소할수록 역화한계 당량비가 지속적으로 증가되어 역화 발생이 억제되는 것을 알 수 있다. 밸브오버랩기간이 없는 VOP 0°CA인 경우에 확장되는 역화한계 당량비의 확장율은 최대 토크가 발생하는 밸브오버랩기간 VOP 30°CA인 경우에 비교하여 약 53%정도로 현저히 증가하는 것을 보이고 있다.

상기와 같이 밸브 오버랩기간을 감소시킴에 따라 역화한계당량비가 확장되는 것은 조기착화 된 화염이 역류될 가능성이 감소하는데 의한 영향으로 볼 수 있다. 그러나 주지의 사실과 마찬가지로

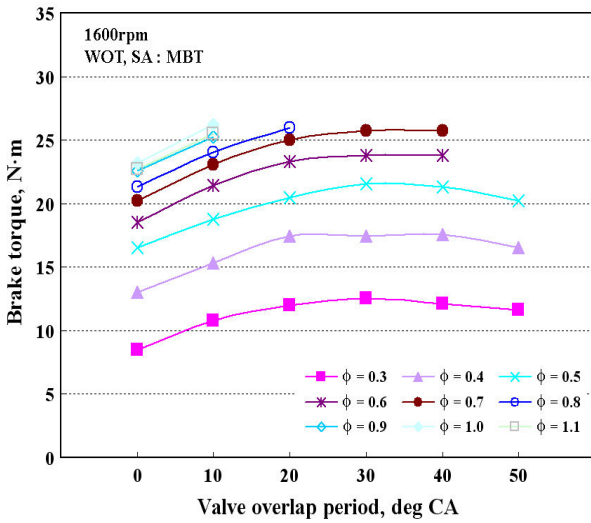


Fig. 5 Brake torque versus valve overlap period for various fuel-air equivalence ratio

로 밸브오버랩기간을 적정한 값보다 감소 또는 증가시키면 체적효율의 저하가 야기된다. 이로 인한 공급열량의 감소로 기관토크 및 연소실내의 온도가 감소되며, 이것이 주원인이 되어 역화발생이 억제될 가능성이 있다.

이를 확인하기 위하여 먼저 밸브오버랩기간의 변화에 대한 기관토크를 각각의 당량비에 대해 나타낸 것이 Fig. 5이다.

흡기관 분사식 수소기관의 토크는 타종의 연료를 사용하는 기존의 기관과 마찬가지로 임의 밸브오버랩기간에서 최고치를 나타내고, 이보다 감

소 또는 증가시키는데 따른 흡입기간의 감소 또는 흡입된 신기의 역류에 의해 모두 감소되는 정성적 경향을 나타낸다. 최고 토크가 발생하는 밸브오버랩기간 30°CA는 주어진 실험조건하에서 적정한 밸브오버랩기간이라는 것을 나타내는 것이다. 그리고 밸브오버랩기간을 이보다 감소시키는 경우, 기관 토크의 감소가 VOP를 증가시키는 것보다 모든 당량비에 대해 현저한 것은 체적효율이 신기의 역류보다 흡입기간의 감소영향에 더 좌우된다는 것을 의미하는 것이다.

연소실의 벽표면온도는 국부적으로 다르지만 전반적으로 연소가스의 온도에 좌우될 것이므로 밸브오버랩기간의 변화에 따른 실린더 내 가스온도의 최고치를 Fig. 6에 나타내어 평가하였다. 여기서 실린더 내 가스온도는 측정된 연소압력과 열역학적 상태방정식을 사용하여 결정하였다.

그림에 나타난 바와 같이 밸브오버랩기간의 변화에 따른 연소가스의 최고 온도는 현저히 변화하여 본 실험조건에서 적정 밸브오버랩기간으로 평가되는 VOP 30°CA와 VOP 0°CA 경우의 가스온도 차이는 약 1000K에 이른다. 이것은 밸브오버랩기간의 감소에 따른 역화한계당량비의 확장이 흡입기간 감소에 따른 체적효율의 감소에 기인할 수 있음을 의미하는 것이다.

상기와 같은 영향을 배제하고 밸브오버랩기간의 변화에 따른 역화발생 억제의 가능성을 파악하기 위해 다음과 같이 공급열량을 동일하게 한 경우의 역화발생여부를 해석하였다.

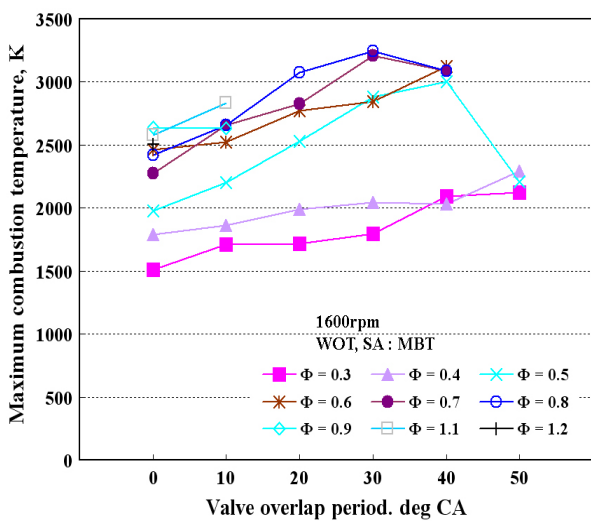


Fig. 6 Maximum gas temperature versus valve overlap period

3.2 동일 열량공급시의 밸브오버랩기간의 변화에 의한 역화한계 당량비 확장

밸브오버랩기간 0°CA와 공급열량을 동일하게 throttle을 조절하여 밸브오버랩기간을 변화시킨 경우 역화한계 당량비를 나타낸 것이 Fig. 7이다.

그림에 나타난 바와 같이 역화한계 당량비는 동일열량 공급 시에도 VOP가 변화하는데 따라 체적효율이 증감하는 경우의 Fig. 4와 마찬가지로 밸브오버랩기간을 감소시킴에 따라 확장되는 경향을 나타낸다. 밸브오버랩기간을 VOP 30°CA에서 VOP 0°CA로 감소시키는 경우의 역화한계 당량비의 확장율은 약 74%정도인 것을 보이고 있다. 전술한 바와 같이 밸브오버랩기간 변화 시의 공급열량을 모두 동일하게 하여 공급열량변화에

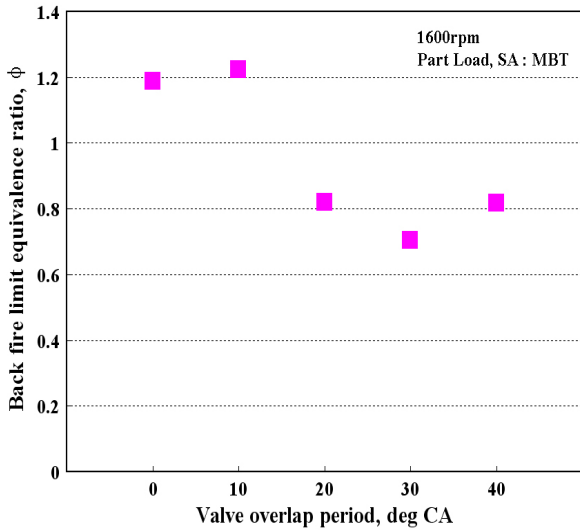


Fig. 7 Back fire limit equivalence ratio according to valve overlap period

다른 역화발생요인을 배제하였으므로 이 결과는 순수하게 밸브오버랩기간의 감소로 역류가능성이 줄어든 것에 기인하리라 생각되나 다음과 같이 세부적으로 검토하였다.

Fig. 8은 밸브오버랩기간이 변화하여도 동일 열량을 기관 실린더 내에 공급하기 위한 공기유량계의 수두차이를 나타낸 일례로서 모터링 시의 약 85% 부하에 대한 것이다. 여기서 WOT의 결과는 밸브오버랩기간이 변화하는데 따라 흡입공기량이 변화하는 경우를 나타낸 것이다.

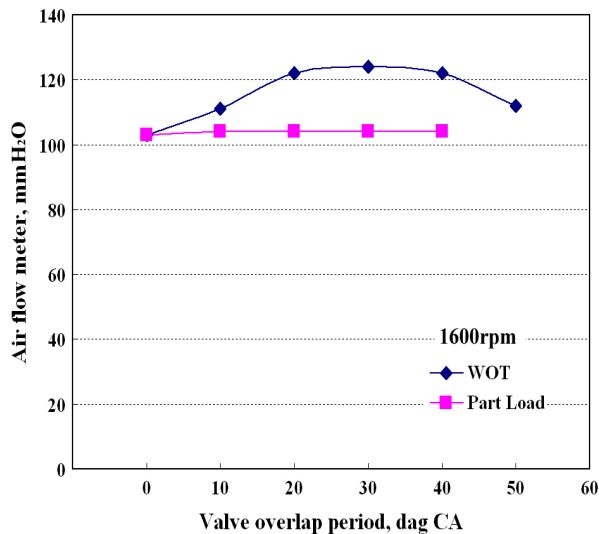


Fig. 8 Air flow meter pressure difference measurement versus VOP in 85% load and WOT during motoring

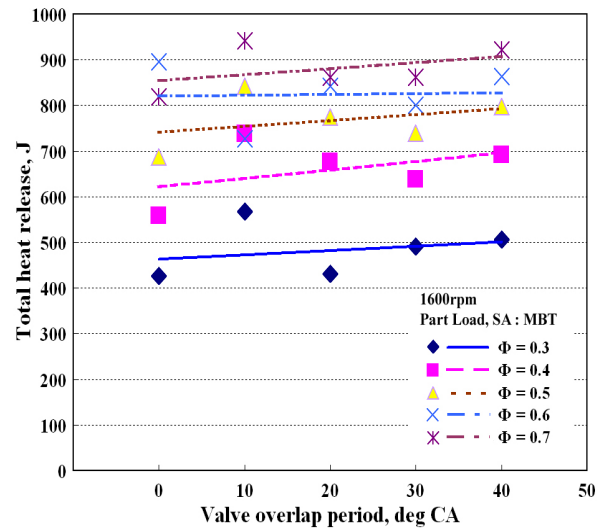


Fig. 9 Total heat release versus valve overlap period

밸브오버랩기간을 변화시키는 경우의 흡입공기량은 흡입관로의 throttle을 조절하여 VOP 0°CA 경우에 흡입되는 흡입공기량을 기준으로 일정하게 유지하였다.

한편 주지의 사실과 마찬가지로 동일 열량의 연료가 공급되어도 혼합기의 혼합률과 실린더 내의 유동 및 난류강도 등에 따른 연소상태의 변화로 발생열량은 차이가 난다. 밸브오버랩기간은 흡입되는 혼합기의 관성력, 유동패턴 등을 변화시키므로 동일 열량공급 시라도 밸브오버랩기간의 변화에 대한 열발생량은 Fig. 9에 나타난 바와 같이 약간의 증감을 나타낸다. 그리고 VOP의 감소에 따라 열발생량은 전반적으로 미소하게 감소하는 경향이 있지만 대체로 그리 큰 차이가 없는 것으로 볼 수 있다. 이 결과와 85% 부하 시 VOP 10°CA의 열발생량이 모든 당량비에서 약간 큰데 불구하고 Fig. 7에 나타난 바와 같이 이 경우의 역화한계 당량비가 오히려 증가하는 경향은 전술한 바와 같이 역화감소가 역류가능성의 감소에 의한 것이라는 것을 확인하는 것이다. 따라서 밸브오버랩기간 감소에 의한 억제 가능성은 높은 것으로 볼 수 있지만 추후 다양한 운전조건, 역화발생경과의 해석 등에 대한 다각적인 검토가 필요한 것으로 생각된다.

통상 출력증가를 위해 공급열량을 증가시키고 있으나 수소기관의 경우 역화가 발생되어 출력증가에 한계가 있다. 그러나 상기에 나타난 바와 같이 밸브오버랩기간을 감소시키면 역화억제의

가능성이 있으므로 밸브오버랩기간을 변화시키면서 과급으로 출력향상 도모 가능하다는 것을 의미한다. 또한 밸브오버랩기간의 감소에 의한 확장효과를 증대시키기 위해서는 흡기 밸브와 배기 밸브 타이밍을 동시 변화시켜 밸브오버랩기간을 변화시키는데 대한 연구가 필요한 것으로 생각된다.⁽¹¹⁾

4. 결 론

밸브오버랩기간이 흡기관 분사식 수소기관의 역화발생에 미치는 영향을 해석하기 위하여 기계식 가변 밸브 타이밍 장치가 장착된 기관에 대한 성능해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

개발된 MCVVT 시스템을 이용한 밸브오버랩기간 변화를 통해 밸브오버랩기간이 감소하면 역화한계당량비가 증가하였다. WOT의 경우 밸브오버랩기간이 0°CA와 30°CA를 비교했을 때 역화한계당량비는 53%의 확장을 보이고 있다. 그러나 공급열량의 감소로 인하여 제동토크는 17% 감소하였다.

흡입공기량을 조절하여 85% 부하로서 같은 공급열량을 공급하는 조건일 때 밸브오버랩기간을 30°CA에서 0°CA로 감소시킨 경우의 역화한계당량비의 확장율은 74%인 것을 보이고 있다. 따라서 밸브오버랩기간의 감소에 의한 역화억제 가능성이 보이지만 본 실험은 제한된 조건이기 때문에 추후 다양한 운전조건, 역화발생경과의 해석 등에 대한 다각적인 검토가 필요한 것으로 생각된다.

참고문헌

(1) J. M. Kim, Y. T. Kim, J. T. Lee and S. Y. Lee, 1995, "Performance Characteristics of Hydrogen-Fueled Engine with the Direct Injection and Spark Ignition System", *SAE Technical paper*, No. 952488, pp. 162~175

(2) S. Furuhashi, 1977, "Combustion Improvement in a Hydrogen Fueled Engine", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 2, pp. 329~337

(3) J. M. Kim, Y. T. Kim, S. Y. Lee, J. T. Lee, 1995, "Performance Characteristics of Hydrogen Fueled Engine with the Direct Injection and Spark

Ignition System", *SAE International*, SAE 952498, pp. 167~175

(4) F. E. Lynch, 1974, "Backfire Control Techniques for Hydrogen Fueled Internal Combustion Engines", *International Association for Hydrogen energy*, Part. B, pp.686~696

(5) J. T. Lee, Y. Y. Kim, C. W. Lee, 2000, "An Investigation of a Cause of Backfire and its Control due to Crevice Volumes in a Hydrogen Fueled Engine", *ASME*, ICE-Vol. 34-3, pp. 23~30

(6) J. B. Finegold and Wm. D. Van Vorst, 1974, "Engine Performance with Gasoline and Hydrogen", *International Association for Hydrogen energy*, part B, pp.685~696

(7) Y. Y. Kim, T. H. Ryu, J. T. Lee, 2002, "Backfire Occurrence by Abnormal Electric Discharge In Hydrogen Fueled engine", *Trans. of the Korea Hydrogen Energy Society*, Vol. 13, No. 1, pp. 65~73

(8) Hailin Li, Ghazi A. Karim, 2003, "Knock in spark ignition hydrogen engines", *International Association for Hydrogen energy*, Vol.29, pp. 859~865

(9) J. K. Kang, T. C. Huynh, K. C. Noh, J. T. Lee and J. H. Lee, 2006, "A Development and Basic Characteristics of MCVVT Research Hydrogen Engine for Practical Use of External Mixture Hydrogen-Fueled Engine", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 17, No. 3, pp. 255~262

(10) J. K. Kang, T. C. Huynh, K. C. Noh, J. T. Lee and J. H. Lee, 2007, "Feasibility of Backfire Control and Engine Performance with Different Valve Overlap Period of Hydrogen-Fueled Engine with External Mixture", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 18, No. 1, pp.67~74

(11) C. M. White, R. R. Steeper, A. E. Lutz, 2006, "The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review", *International Association for Hydrogen energy*, Vol. 31, Issue 10, pp. 1292~1305