

동일열량공급하의 밸브오버랩기간 변화에 대한 역화억제 검토

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

*성균관대학교 대학원, **성균관대학교 기계공학부

A Investigation of Back Fire Control with Valve Overlap Period Change In the Same Supply Energy

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

**Grad. School of Sungkyunkwan Univ.*

***School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.,
300 Chunchun-dong Jangan-gu Suwon-Si Gyeonggi-do 440-746, Korea*

ABSTRACT

To grasp a feasibility of back fire control by valve overlap period, back fire limit equivalence ratio was estimated with valve overlap period which has the same supply energy and positive intake pressure as valve overlap period 30° CA.

As the result, it was shown that the smaller valve overlap period has the higher back fire limit equivalence ratio under valve overlap period 30° CA as well as VOP 0° CA. This result means that expansion of back fire equivalence ratio by decreasing valve overlap period was caused by decrease of back flow duration of flame from in-cylinder to intake port than decrease of lower supply energy.

KEY WORDS : hydrogen-fueled engine with external mixture (흡기관 분사식 수소기관), mechanical continuous variable valve timing (기계식 연속 가변 밸브 타이밍), back-fire (역화), valve overlap period (밸브 오버랩 기간)

1. 서 론

흡기관 분사식 수소기관의 역화억제는 수소기관을 실용화시키기 위한 관건이다. 역화발생의 억제에 관한 지금까지의 연구는 연소실 온도 감소, 피스톤 크레비스 및 이상 방전의 제거에 의해 연소실 내에 존재하는 모종의 점화원을 제거하는 것

에 초점이 주어졌다. 역화는 모종의 점화원에 의해 조기착화 된 화염이 밸브오버랩기간 중 빠른 연소 속도에 의해 흡기관내로 역류하는 것으로 알려져 있다. 따라서 역화는 모종의 점화원뿐 아니라 밸브오버랩기간을 감소시켜 화염이 역류되는 기간을 감소시키면 억제될 가능성이 있다¹⁻⁶⁾.

저자들은 상기 관점으로부터 밸브오버랩기간을 감소시킨 경우 역화한계 당량비가 증가하는 가능성을 밝혔다. 흡입공기량의 감소로 공급열량이 저

[†]Corresponding author : phantomzwei@naver.com

감되며 낮아진 연소온도로 인하여 역화가 억제될 수 있다. 따라서 밸브오버랩기간이 변화하여도 공급열량을 동일하게 하여 역화발생을 파악하였고 이 경우에도 역화한계 당량비가 확장되는 것이 보여졌다. 일정하게 공급한 열량은 밸브오버랩기간 VOP가 0°C인 경우로서 공급열량이 모든 밸브오버랩기간에 대해 공급열량이 가장 작으므로 모든 영역에서 역화가 발생되지 않을 것으로 예측하였다. 그렇지만 오히려 일부영역에선 자연흡기의 경우보다 역화한계 당량비가 감소하는 경향이 나타났다. 이것은 흡기관 내 부압으로 인하여 피스톤 크레비스 내의 점화원이 실린더내로 역류하여 역화가 오히려 잘 발생될 가능성이 있다⁷⁻⁹⁾. 따라서 공급열량이 크고 흡기관내의 압력이 정압인 밸브오버랩기간 VOP 30°C를 기준으로 한 동일공급열량 조건하에서의 역화발생 여부의 해석이 필요하다.

본 연구에서는 밸브오버랩기간의 변화에 의한 역화억제 가능성을 밝히고자 최대토크 발생 밸브오버랩기간인 VOP 30°C와 동일하게 열량을 공급하여 밸브오버랩기간을 변화시킨 경우의 역화에 관련된 제반 특성을 해석하고 또한 이를 밸브오버랩기간 VOP 0°C의 경우와 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 전체적인 실험장치의 개략을 나타낸 것이다. 실험장치는 연구용 단기통 수소기관, 기관동력계, 연료공급장치, 기관운환장치, 공기유량측정장치, 연소실 압력측정 장치, 냉각장치 및 밸브오버랩기간 감소 시 저감된 흡입공기량을 보상하기 위한 과급장치 등으로 구성된다.

실험용 수소기관은 보어 및 스트로크가 각각 86mm이고 커넥팅 로드 길이는 149.25 mm, 압축비는 $\epsilon=10.5$ 인 배기량 499.5 cc의 DOHC 단기통 기관이다. 기관의 밸브오버랩기간은 MCVVT(Mechanical Continuous Variable Valve Timing) 시스템 축의 움직임을 흡입 및 배기 캠축에 각각 구동벨트로 연결하여 흡배기 밸브 캠의

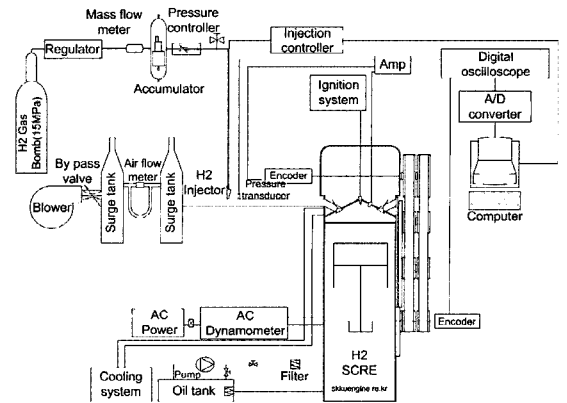


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

위상각 변화로 독립적이고 연속적으로 변화시킬 수 있다.

수소연료는 150bar의 고압보배에서 공급되어 압력조절기에서 10bar의 일정한 압력으로 1차 감압된다. 그리고 필터와 수소유량계를 거쳐 저압 조절기에서 3bar로 2차 감압되어 어큐뮬레이터를 거쳐 기관으로 공급된다. 수소연료 공급량은 인젝션 컨트롤러를 통하여 조절되며 열전대식 유량계로 측정하였다. 기관의 냉각에는 직수를 사용하였고 실린더 헤드 및 블록에 독립적으로 공급된다.

Fig. 2는 밸브오버랩기간 변화 시 저감된 흡입 공기량을 보상하기 위한 흡입공기 보상장치를 나타낸 것이다. 흡입공기보상 장치는 외부 동력에 의

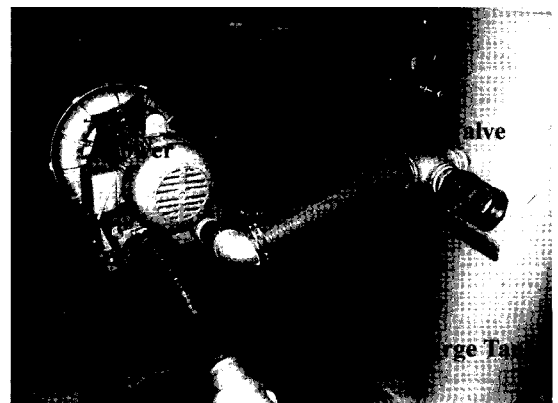


Fig. 2 Photograph of supercharge system for compensation of supply energy

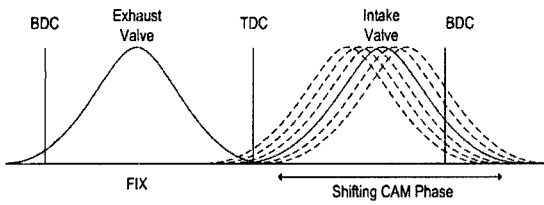


Fig. 3 Schematic diagram of valve overlap period and variable valve timing

해 구동되는 blower(0.75 kW, 3 m³/min)로 구성된다. Blower의 출구 쪽에는 공기유량을 제어하기 위한 by pass valve를 부착하였다. By pass valve의 후방에는 과급에 의한 맥동현상을 저감시키기 위한 2개의 surge tank(110 l×2)를 설치하였으며, 이 사이에 공기유량계를 부착하였다.

실험변수는 밸브오버랩기간이며, 각각에 대해 연료공기 당량비를 변화시켰다. 밸브오버랩기간 (Valve Overlap Period: 추후 VOP라 칭함)은 배기 밸브의 닫힘시기를 ATDC 10° CA로 고정시키고 흡기밸브 열림시기를 조절하여 밸브오버랩기간을 40° CA에서 0° CA까지 10° CA 간격으로 위상각을 조정하였다. 밸브오버랩기간의 변화에 따른 각각의 흡기밸브의 개폐시기를 나타낸 개략도는 Fig. 3과 같다.

각각의 실험에 대하여 공급열량은 밸브오버랩

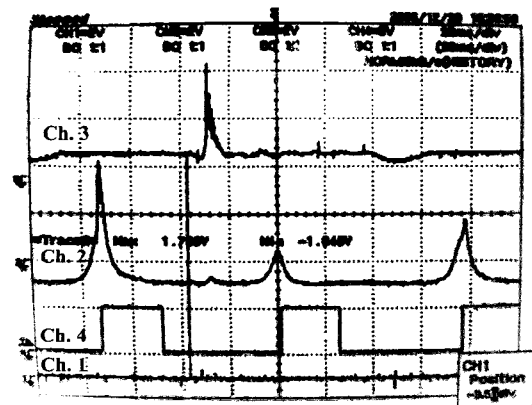


Fig. 4 Photograph of oscilloscope for in-cylinder pressure and intake port pressure with case of back fire or non back fire

기간 30° CA인 경우와 동일하게 하였으며, 기관회전수는 1600 rpm, 점화시기는 MBT로 고정하였다.

3. 동일열량 공급하의 VOP 변화에 따른 역화 및 제반특성

3.1 역화현상과 공급열량 보상법

Fig. 4는 흡기관분사식 수소기관의 역화발생을 파악하기 위한 것으로 역화발생 시 연소실 및 흡기관내의 압력을 나타낸 일례이다.

그림에서 Ch. 2의 첫 번째 파형은 정상연소 시의 일반적인 실린더 내 압력 파형이다. 두 번째 파형은 역화발생 시의 연소실내 압력으로서 역화가 발생된 후 연소된 가스가 흡입되어 실화되므로 모터링 시의 압력경과 곡선을 나타내고 있다. Ch. 3의 파형은 역화발생 시 흡기관내의 압력파형을 나타내는 것으로 흡기관내의 압력이 실린더내로부터 역류된 화염으로 인하여 급격히 상승하는 것을 나타낸다. 역화발생여부는 상기 결과와 같은 실린더 및 흡기관의 압력변화와 역화소음으로부터 판단하였다.

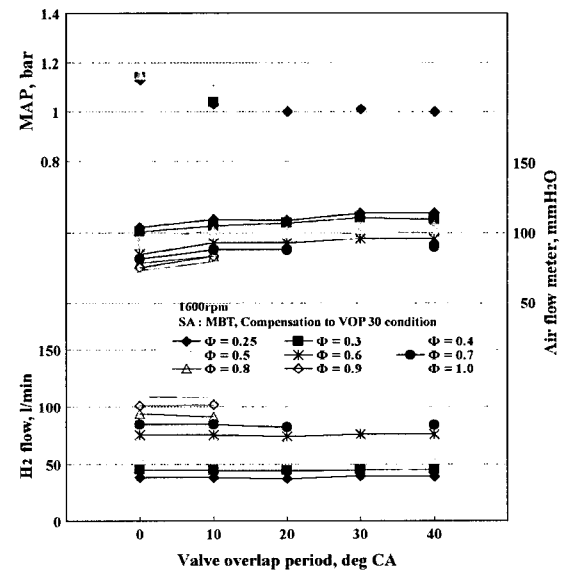


Fig. 5 MAP(Manifold Absolute Pressure), pressure differences of air and fuel flow meters with the same supply energy as VOP 30° CA condition

Fig. 5는 밸브오버랩기간이 변화하여도 동일 열량을 기관 실린더 내에 공급하기 위한 흡기관내 압력(Manifold absolute pressure, MAP)과 공기유량계의 수두차이 및 수소연료 유량을 나타낸 것이다.

전술한 바와 같이 밸브오버랩기간 감소에 의한 흡입공기량의 감소는 과급에 의해 보상하였으므로 밸브오버랩기간이 감소할수록 흡기관내의 압력은 증가하게 된다. 따라서 흡입공기량이 동일하여도 공기유량계의 수두차이는 흡기관내 압력증가에 의한 밀도증가로 밸브오버랩기간의 감소에 따라 약간 감소하는 경향이다. 밸브오버랩기간이 없는 VOP 0° CA의 흡기관내 압력은 VOP 30° CA와 비교할 때 약 15% 정도로 증가하는 것을 보이고 있다.

상기와 같은 방법으로 밸브오버랩기간의 변화시 흡입공기량을 일정하게 보상하고 이에 대응하여 각 연료공기 당량비에서 요구되는 수소연료 유량을 그림에 나타난 바와 같이 공급하였다.

Fig. 6은 밸브오버랩기간 VOP 30° CA와 VOP 0° CA와 같은 체적효율을 갖는 각각의 조건에서 동일 열량 공급시 흡기관분사식 수소기관의 밸브오버랩기간을 변화시킨 경우의 역화한계 당량비를 나타낸 것이다. 여기서, 역화한계 당량비는 역화가 발생하기 이전까지 기관이 안정되게 운전될 수 있는 농후 영역의 연료공기당량비의 한계로 정의하였다.

그림에 나타난 바와 같이 밸브오버랩기간 VOP 30° CA 경우의 열량과 동일하게 열량을 공급한 경우의 역화한계 당량비는 VOP 0° CA 조건하의 동일열량을 공급한 경우에 비해 공급열량이 큰 영향에 기인하여 전반적으로 작은값을 나타내고 있다. 그리고 두 경우의 역화한계 당량비는 모두 밸브오버랩기간의 감소에 따라 지속적으로 증가되는 것을 알 수 있다.

밸브오버랩기간 VOP 30° CA 경우의 동일공급 열량 조건하에서 밸브오버랩기간이 없는 VOP 0° CA인 경우에 확장되는 역화한계 당량비의 확장률을 VOP 30° CA에 대해 비교하면 약 72% 정도로 현저히 증가하는 것을 보이고 있다.

전술한 바와 같이 밸브오버랩기간 VOP 0° CA와 연소실내에 같은 동일열량을 공급한 경우 공급

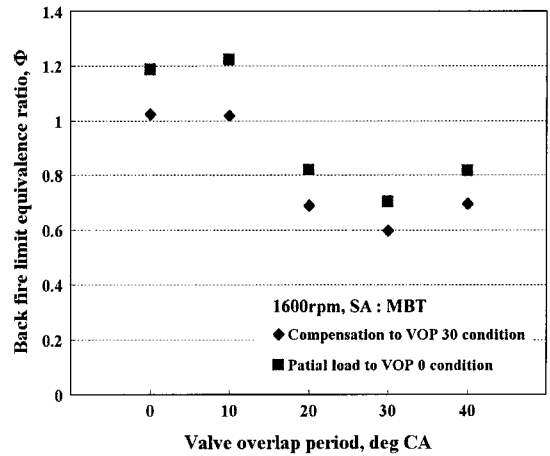


Fig. 6 Back fire limit equivalence ratios versus valve overlap period with supply energy of VOP 30° CA and VOP 0CA

열량이 가장 적어 고온의 점화원이 생기기 어렵다. 이로 인해 밸브오버랩기간을 크게 하여도 역화한계 당량비는 크게 변함이 없을 것으로 생각하였으나 역화한계 당량비는 현저히 감소하는 것을 보이고 있다. 이것은 다양한 인자에 기인하여 그 원인을 명확히 설명하기 어렵다. 그러나 선행 연구한 피스톤 크레비스 볼룸내의 혼합기에 의한 역화원인으로 설명하면 피스톤링 크레비스 볼룸내의 고압으로 압축된 희박혼합기가 느린 연소를 하면서 팽창과정 중 연소실내로 역류하는 것으로 생각된다. 그리고 밸브오버랩기간 VOP 30° CA 조건하의 동일열량 공급조건 즉 흡기관내의 압력이 정압인 경우에도 상기와 동일한 경향을 나타내는 것은 피스톤 크레비스 볼룸내 혼합기의 압력이 팽창시의 실린더 압력에 비해 상대적으로 높으므로 역화발생차이에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 볼 수 있다.

상기의 결과는 밸브오버랩기간의 감소에 의한 역화한계 당량비의 증가가 공급열량감소에 의한 영향보다 밸브오버랩기간의 감소에 의해 실린더 내에 형성된 화염이 흡기관 내로 역류하는 가능성이 감소하는데 기인하는 것을 의미한다.

3.2 성능특성

밸브오버랩기간 VOP 30° CA를 기준으로 한 동

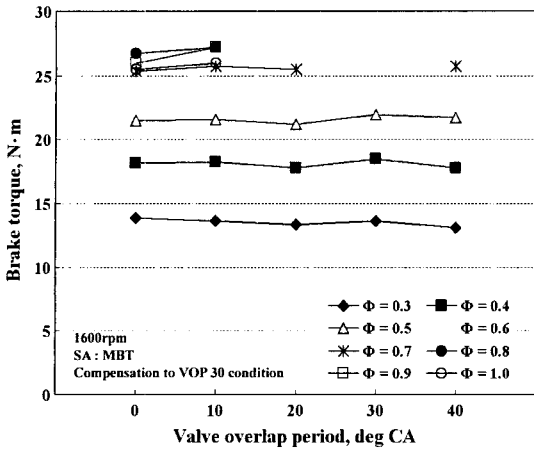


Fig. 7 Brake torque versus valve overlap period with supply energy of VOP 30°CA condition

일일량 공급 조건에서 출력 특성을 파악하기 위해 각각의 연료공기 당량비에 있어서 밸브오버랩기간을 변화시킨 경우의 정미토크를 나타낸 것이 Fig. 7이다. 이 경우 흡입공기량 보상을 위한 과급기에 소요된 동력을 정미토크 산출에 고려하지 않았다.

각각의 연료공기 당량비에 있어서 밸브오버랩기간을 변화시킨 경우의 정미 토크 차이는 미소하지만 대체로 일정한 것으로 볼 수 있다. 상기결과는 동일 운전조건하의 결과이므로 밸브오버랩기간 변화시 대체로 동일한 열량이 공급된다는 것을 의미한다. 최대 정미토크는 밸브오버랩기간 VOP 10°CA에서 발생하는 것을 보이고 있다.

Fig. 8은 전술한 운전조건하에서 얻어진 정미열 효율을 밸브오버랩기간의 변화에 대해 나타낸 일례이다. 그림에 나타난 바와 같이 밸브오버랩기간의 변화에 대한 수소기관의 열효율은 통상의 가솔린기관보다 고회박인 연료공기 당량비 약 $\phi = 0.4 \sim 0.5$ 부근에서 최대치를 보인다.

최대 열효율을 나타내는 연료공기 당량비 $\phi = 0.4$ 와 최소 열효율을 나타내는 $\phi = 1.0$ 의 경우는 약 36% 차이를 보인다. 또한 밸브오버랩기간의 감소에 따라 열효율의 변화는 각 연료공기 당량비에 따라 약간의 차이는 있지만 감소분은 연료공기 당량비 변화시보다 적은 것으로 보인다.

선행 연구에서 자연흡기 방식의 경우는 연료공기 당량비 $\phi = 0.5 \sim 0.6$ 에서 최대 열효율이 얻어졌다. 이에 반하여 밸브오버랩기간 VOP 30°CA의 공급열량 조건시 $\phi = 0.4 \sim 0.5$ 에서 고열효율 영역을 보이는 것은 같은 연료공기 당량비 임에도 공급열량의 증가로 연소가 향상되는데 의한 것으로 볼 수 있다^{8~9)}.

Fig. 9는 밸브오버랩기간 VOP 0°CA에 있어서 VOP 30°CA의 공급열량 조건과 VOP 0°CA의 공급열량 조건에서 각각의 연료공기 당량비에 따른 정미토크와 정미열효율을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 밸브오버랩기간이 감소하면 공급열량을 증가시켜도 역화가 억제되어 고출력이 가능하다. 그러나 전술한 바와 같이 고회박 영역에서 발생되므로 열효율은 감소하게 된다. 즉, 밸브오버랩기간 VOP 30°CA에서 0°CA로 감소할 때 역화한계 당량비는 72% 증가되어 정미토크가 12% 정도 증가되지만 오히려 정미열효율은 36% 정도가 감소되어 열효율 측면에서 바람직하지 않다. 수소엔진 개발의 최종목적은 고효율과 고출력을 동시에 달성하는 것이다. 따라서 수소기관의 운전은 고회박 혼합기를 사용하여 고효율을 추구하고 밸브오버랩기간을 적정하게 감소시켜 과급을 하는 것이 바람직하다고 생각된다.

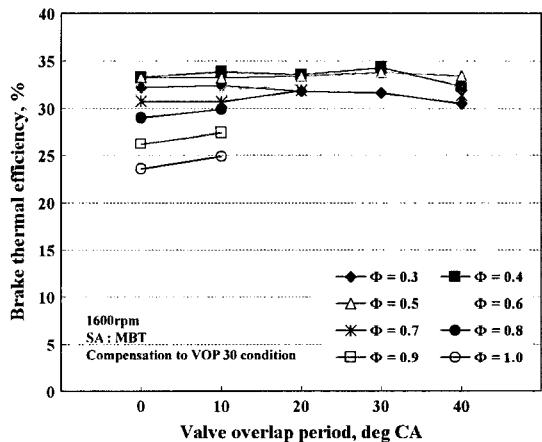


Fig. 8 Brake thermal efficiency versus valve overlap period as compensation to VOP 30°CA condition

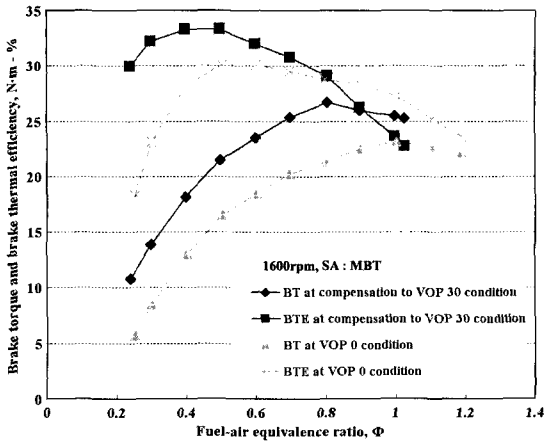


Fig. 9 Brake torque(BT) and brake thermal efficiency(BTE) versus fuel-air equivalence ratio at Valve overlap period 0° CA

3.3 연소특성

Fig. 10은 동일열량이 공급되는 연료공기 당량비 $\phi=0.6$ 인 경우, 밸브오버랩기간의 변화에 대한 연소기간을 나타낸 것이다. 여기서 초기연소기간은 0%에서 10%, 주연소기간은 10%에서 90%, 후기연소기간은 90%에서 100%까지의 질량연소율에 달하는 소요기간으로 정의한다.

전반적으로 밸브오버랩기간이 감소할 경우 총 연소기간은 증가하는 경향을 보이고 있다. 점화성을 보여주는 초기연소기간의 경우 밸브오버랩기간이 감소할수록 증가하며 이것은 흡입되는 신기의 유동내의 난류 강도 차이에 기인함을 보여주는 일례로 볼 수 있다. 또한 연소기간이 길면 역류발생 가능성이 많다. 그런데도 역화한계 당량비가 증가되는 것은 역류기간이 감소에 의한다는 것을 재차 확인하는 결과로 볼 수 있다.

Fig. 11은 밸브오버랩기간 VOP 30° CA와 동일 열량을 공급한 조건에서 각 밸브오버랩기간에 대한 총열발생량을 나타낸 일례이다.

동일열량의 연료가 공급되어도 혼합기의 혼합율과 실린더내의 유동 및 난류강도 등에 따라 연소상태의 변화로 열발생량은 차이가 난다. 밸브오버랩기간과 밸브개폐 시기는 흡입되는 혼합기의

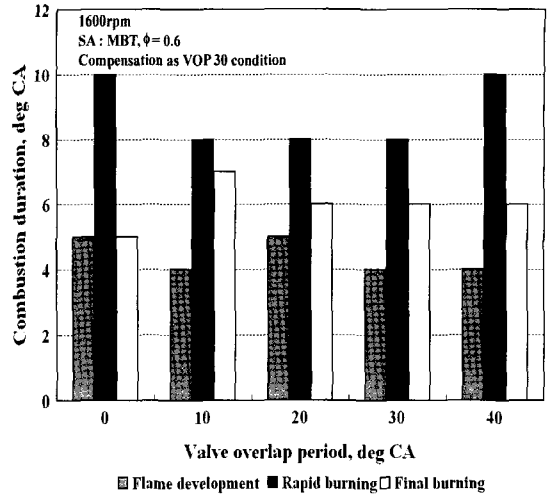


Fig. 10 Combustion duration versus valve overlap period

혼합기간, 관성력 및 유동패턴 등을 변화시키므로 동일 열량을 공급하였을지라도 상기와 같이 약간의 차이를 보인다. 이로 인해 밸브오버랩기간의 감소에 따라 열발생량은 미소하게 감소하는 경향을 보이지만 대체로 큰 차이가 없는 것으로 볼 수 있다.

이와 같이 열발생량은 거의 동일한데도 불구하고 역화한계 당량비가 증가하는 것은 전술한 바와 같이 역화발생 감소가 역류되는 기간에 기인하는 것을 재확인하는 것이다.

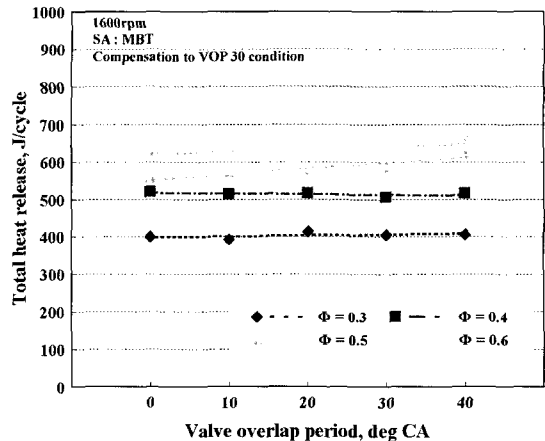


Fig. 11 Total heat release versus valve overlap period with various fuel-air equivalence ratio

밸브오버랩기간 감소에 의한 억제 가능성은 높은 것으로 볼 수 있다. 그렇지만 추후 흡배기 밸브를 동시에 변화시키는 것과 같은 다양한 운전조건, 역화발생경과의 해석 등을 통해 역화억제 규명을 위한 다각적인 검토가 필요한 것으로 생각된다¹⁰⁾.

4. 결 론

밸브오버랩기간이 흡기관 분사식 수소기관의 역화발생에 미치는 영향을 파악하기 위하여 밸브오버랩기간 VOP 30°C를 기준으로 동일공급열량 조건에 대해 해석하였다.

역화한계 당량비는 밸브오버랩기간 VOP 30°C의 동일열량 공급 조건에 있어서도 열량이 가장 적고 흡기관내의 압력이 부압인 밸브오버랩기간 VOP 0°C의 경우와 마찬가지로 밸브오버랩기간이 감소하면 증가하는 것이 보여졌다. 이 결과는 밸브오버랩기간의 감소에 의한 역화한계 당량비의 증가가 공급열량감소에 의한 영향보다 밸브오버랩기간의 감소에 의해 실린더 내에 형성된 화염이 흡기관내로 역류하는 가능성이 감소하는데 기인하는 것을 의미한다.

역화한계 당량비가 높아짐에 따라 출력은 증가되지만 열효율은 감소하는 경향을 갖고 있으며 고회박 영역에서 고열효율 영역을 보인다. 상기 결과를 고려하면 고회박 혼합기를 사용하여 고효율을 추구하고 밸브오버랩기간을 적정하게 감소시켜 공급을 하는 것이 바람직하다고 생각된다.

밸브오버랩기간이 0°C와 30°C를 비교했을 때 역화한계 당량비는 72%의 확장을 보이고 있다. 또한 밸브오버랩기간이 VOP 10°C인 경우에 최대토크가 얻어졌으며 열효율은 $\phi=0.4\sim 0.5$ 영역에서 최대치를 보였다. 그러나 밸브오버랩기간 VOP 0°C의 경우 정미토크는 12% 증가되는 반면 정미열효율은 오히려 36% 감소되었다.

상기와 같이 밸브오버랩기간의 감소에 의한 역화억제 가능성을 재확인하였지만 본 실험은 제한된 조건이기 때문에 추후 다양한 운전조건, 역화발생경과의 해석 등에 대한 다각적인 검토가 필요한

것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) S. Furuhama, "Combustion Improvement in a Hydrogen Fueled Engine", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 2, 1977, pp. 329-337.
- 2) F. E. Lynch, "Backfire Control Techniques for Hydrogen Fueled Internal Combustion Engines", International Association for Hydrogen energy, Part. B, 1974, pp. 686-696.
- 3) J. T. Lee, Y. Y. Kim, C. W. Lee, "An Investigation of a Cause of Backfire and its Control due to Crevice Volumes in a Hydrogen Fueled Engine", ASME, ICE-Vol. 34-3, 2000, pp. 23~30.
- 4) J. B. Finegold and Wm. D. Van Vorst, "Engine Performance with Gasoline and Hydrogen", International Association for Hydrogen energy, part B, 1974, pp. 685-696.
- 5) Y. Y. Kim, T. H. Ryu, J. T. Lee, "Backfire Occurrence by Abnormal Electric Discharge In Hydrogen Fueled engine", Trans. of the Korea Hydrogen Energy Society, Vol. 13, No. 1, 2002, pp. 65-73.
- 6) Hailin Li, Ghazi A. Karim, "Knock in spark ignition hydrogen engines", International Association for Hydrogen energy, Vol. 29, 2003, pp. 859-865.
- 7) J. K. Kang, T. C. Huynh, K. C. Noh, J. T. Lee and J. H. Lee, "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, 2007, pp. 67-74.
- 8) 강준경, Huynh Thanh Cong, 노기철, 이종태, "밸브오버랩기간 변화에 의한 흡기관 분사

- 식 수소기관의 역화억제에 관한 연구”, 대한기계학회, 대한기계학회 2007년도 춘계대회 강연 및 논문 초록집, 2007, pp. 554-559.
- 9) Huynh Thanh Cong, 강준경, 노기철, 이종태, “A study on Performance and Combustion Characteristics for Valve Overlap Period Variation in a Hydrogen-fueled Engine with External Mixture”, 한국자동차 공학회, 한국자동차공학회 2007년 춘계학술대회 논문집 Vol. 4, 2007, pp. 1936-1941.
- 10) C. M. White, R. R. Steeper. A. E. Lutz, "The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review", International Association for Hydrogen energy, Vol. 31, Issue 10, 2006, pp. 1292-1305.