

밸브 오버랩 기간이 없는 흡기관 분사식 수소기관의 성능 및 역화특성

이광주[†], 강준경*, Huynh Thanh Cong*, 노기철**, 이종태**

*성균관대학교 대학원, **성균관대학교 기계공학부

Characteristics of Performance and Back-Fire for External Mixture Hydrogen Fueled Engine without Valve Overlap Period

K. J. Lee[†], 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 Janan-gu Suwon Gyeonggi-do 440-746, Korea*

ABSTRACT

In order to verify the feasibility of expansion of back-fire limit equivalence ratio in the hydrogen-fueled engine with external mixture, the characteristics of performance and combustion are experimentally analyzed with change of intake/exhaust valve timings under the fixed valve overlap period of 0°CA(non-valve overlap period). These characteristics are also tested for the change of exhaust valve closing timing while intake valve opening timing is fixed to clear the main cause of back-fire occurrence.

As the results, the less valve overlap period center is retarded, the more back-fire limit equivalence ratio increases and back-fire does not occurred after TDC. In addition, it was shown that the control of back-fire is dependent on intake valve opening timing than valve overlap period.

KEY WORDS : valve overlap period(밸브 오버랩기간), back-fire control(역화억제), hydrogen-fueled engine with external mixture(흡기관 분사식 수소기관), valve overlap period center(밸브 오버랩 기간 중심점), back-fire limit equivalence ratio(역화한계당량비)

1. 서 론

흡기관 분사식 수소기관은 혼합기간의 증가에 의한 혼합기의 균질도 증가로 인해 직접분사식 수소기관에 비해 높은 열효율을 얻을 수 있다. 또한 구조가 간단하여 단기간 내 실용화가 가능하나 고

[†]Corresponding author : kjlee81@skku.edu

Table 1 Specification of test engine

Valve mechanism	DOHC
Bore × Stroke	86 mm × 86 mm
Compression ratio	10.5
Displacement volume	500 cc
IVO/IVC	10 BTDC/67 ABDC
EVO/EVC	34 BBDC/10 ATDC

부하시 역화가 발생되어 고출력 실현에 제약이 있다. 이로 인해 고효율 및 고출력을 갖는 흡기관 분사식 수소기관을 실현시키기 위해서는 역화를 가능한 억제하여 역화가 발생하기 직전의 공기연료비, 즉 역화한계 당량비를 확장시켜야 한다.

본 연구실에서는 냉각수 온도저감, 피스톤 크레비스 볼륨 및 이상방전의 제거에 의해 역화를 억제하려 했으나 한계가 있었다^{1,2)}. 역화는 모종의 점화원에 의해 조기착화된 화염이 밸브 오버랩기간 중 흡기관 내로 역류하는데 기인한다³⁾. 그러므로 역류가능성을 줄이기 위하여 밸브 오버랩기간 (Valve overlap period : 추후 VOP라 칭함) 변화에 초점을 두고 연구를 진행해 왔다. 연구 결과, 밸브 오버랩기간을 감소시키면 역화발생이 억제되며, VOP 10° CA 부근에서 역화한계 당량비가 높게 나타났다^{4,5)}. 동일 밸브 오버랩기간이라도 역화 및 성능은 흡기 및 배기 밸브타이밍에 좌우된다. 이를 확인하고자 VOP 10° CA하에서 밸브 타이밍 변화에 대한 제반특성을 해석한 바 밸브 오버랩기간의 중심점을 지각시키면 역화발생이 감소되는 것을 밝혔다.

본 연구에서는 VOP 10° CA일 때보다 더 높은 역화한계 당량비의 확장가능성을 밝히기 위해 선행연구 결과에서 가장 높은 역화한계 당량비를 보인 밸브 오버랩기간이 없는, 즉 VOP 0° CA에서 흡배기 밸브 타이밍을 변화시켰다. 또한 흡기밸브 열림시기가 역화발생에 중요한 인자인가를 밝히기 위해 흡기밸브 열림시기를 고정시켜놓고 배기밸브

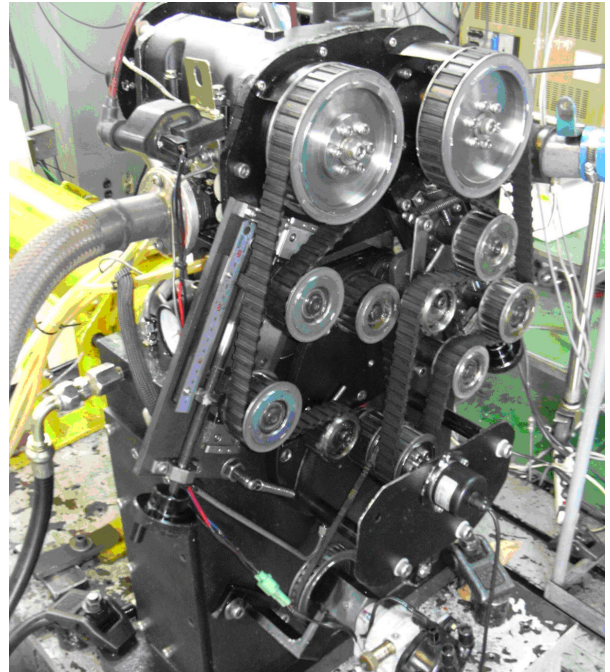


Fig. 1 Photograph of the hydrogen-fueled engine

단함시기를 변화시켰다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 수소기관은 흡기관 분사 방식의 단기통 연구용 기관이며 그 상세한 제원은 Table 1에 나타낸다. 흡기 및 배기 밸브타이밍은 구조 및 제어가 간단하고 밸브 타이밍의 가변 범위가 넓은 기계식 연속 가변 밸브 타이밍(Mechanical Continuous Variable Valve Timing) 시스템을 사용하여 변화시켰다⁶⁾.

Fig. 1은 MCVVT 시스템을 장착한 흡기관 분사방식의 단기통 연구용 기관의 사진이다.

전체 실험장치의 개략도를 나타낸 것이 Fig. 2이다. 실험장치는 수소기관, 동력측정계통, 수소공급계통, 흡기 및 배기계통, 냉각계통 및 데이터 취득부로 구성된다. 수소연료는 150 bar로 충전된 고압가스봄베로부터 1, 2차 감압기를 거쳐 3bar의 일정한 압력으로 어큐뮬레이터를 거쳐 기관으로 공급된다. 연료 공급량은 인젝터 콘트롤러를 통하여 조절되며 열전대식 유량계로 측정하였다. 냉각방식은 수냉식이며 실린더 헤드 및 블록에 독립적으

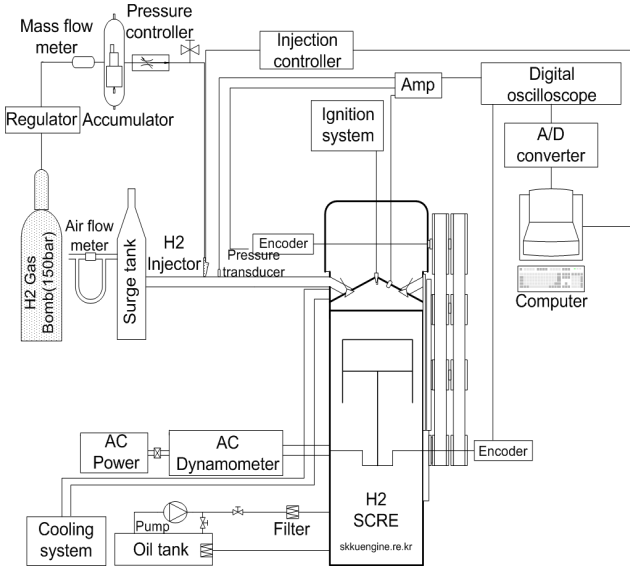


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

로 공급하였다.

실험변수는 밸브 오버랩기간 VOP 0° CA에 대한 흡배기 밸브타이밍이다. 흡기 및 배기 밸브 타이밍은 밸브오버랩기간의 중심점(추후 VOP center라 칭함)으로 표시하였다.

Fig. 3은 흡기 및 배기밸브 타이밍과 밸브 오버랩 기간의 중심점의 관계를 나타낸 것이다. 실험에서 밸브 오버랩기간의 중심점은 15° CA BTDC(IVO, EVC : 15° CA BTDC) 부터 15° CA ATDC(IVO, EVC : 15° CA ATDC)까지 단계적으로 변화시켰다. 또한 흡기밸브 열림시기가 역화발생에 관여하는 중요한 인자인가를 확인하기 위해 흡기밸브 열림시기를 TDC에 고정시키고 배기밸

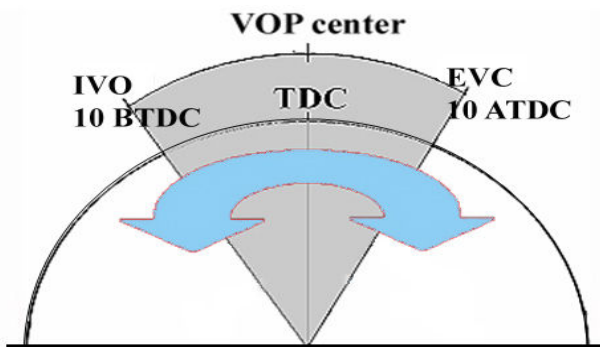


Fig. 3 Schematic diagram of valve overlap period center

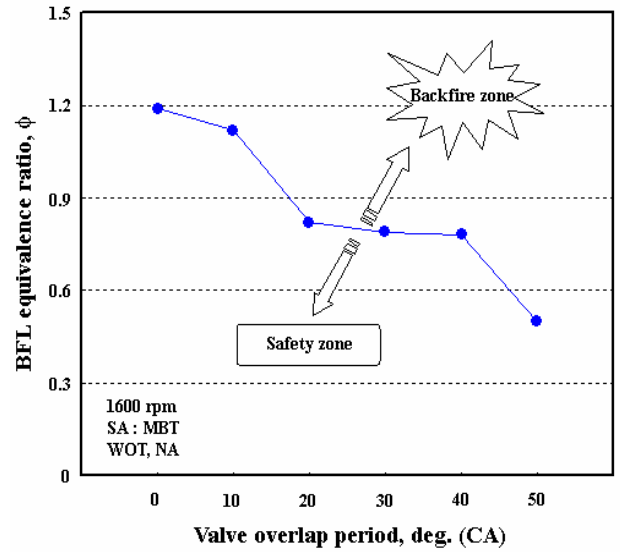


Fig. 4 Backfire limit equivalence ratios versus valve overlap period

브 열림시기를 변화시켰다. 각각의 변수에 대해 연료 공기 당량비를 변화시켰으며, 기관회전수는 1600 rpm, 점화시기는 MBT로 고정시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1 밸브 오버랩기간과 중심점의 변화

밸브 오버랩기간의 변화에 대한 역화한계 당량비를 나타낸 것이 Fig. 4이다. 여기서 밸브 오버랩기간은 배기밸브 닫힘시기를 고정시키고 흡기밸브 열림시기를 변화시켜 VOP 50° CA부터 VOP 0° CA까지 변화시켰다. 밸브 오버랩기간이 감소할수록 역화한계 당량비는 증가하는 경향을 보인다. 이것은 밸브 오버랩 기간 중 모종의 점화원이 역류하는 가능성을 밸브 오버랩기간을 줄임으로서 최소화시키는데 따른 것이라 할 수 있다. 그러나 같은 밸브 오버랩기간이어도 흡배기 밸브타이밍이 동시에 변한다면 연소특성이나 제반성능이 달라지므로 역화한계 당량비가 변화될 수 있다.

Fig. 5는 역화한계 당량비가 높은 VOP 0° CA로 고정시킨 뒤 VOP center 변화에 대한 역화한계 당량비를 VOP 10° CA와 비교하여 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 동일한 밸브 오버랩 기간

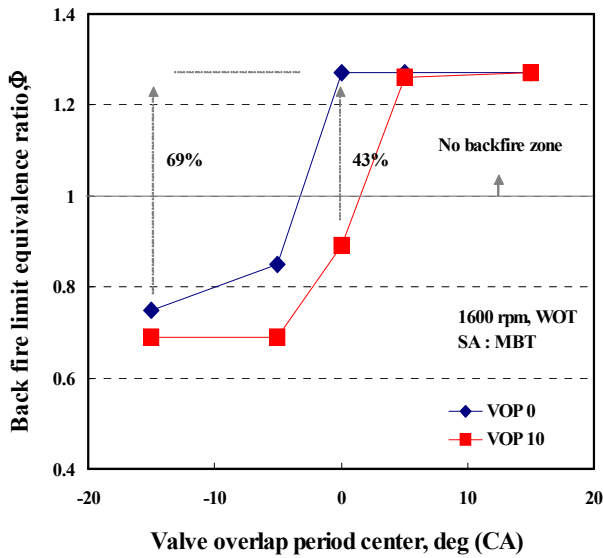


Fig. 5 Backfire limit equivalence ratios versus valve overlap period center

임에도 불구하고 VOP center가 진각될수록 역화 한계 당량비가 감소하며 지각될수록 증가하는 것을 보인다. VOP 0° CA에서 역화가 억제된 VOP center TDC와 15° BTDC의 역화한계 당량비의 차이는 현저한 것을 나타낸다. 또한 VOP center의 위치에 따라 VOP 0° CA와 VOP 10° CA의 역화가 억제되는 시점이 다른 것을 보이고 있다.

VOP 0° CA인 경우 VOP center가 TDC부터 역화가 발생하지 않는 것에 반해 VOP 10° CA인 경우는 VOP center가 5° ATDC부터 역화가 억제된다. VOP center가 동일한 TDC일 때 역화한계 당량비의 차이는 VOP 0° CA가 VOP 10° CA보다 현저히 증가하는 것을 알 수 있다.

전술한 바와 같이 통상 흡기관 분사식 수소기관의 역화발생의 원인으로 지목된 것은 밸브 오버랩 기간이다. 그러나 동일한 밸브 오버랩기간임에도 불구하고 VOP center 변화에 따라 역화발생영역이 다른 것을 보인다.

3.2 VOP center 변화에 따른 성능특성

Fig. 6은 VOP 0° CA에서 VOP center가 변화할 때의 흡기 온도 및 압력을 VOP 10° CA와 비교하

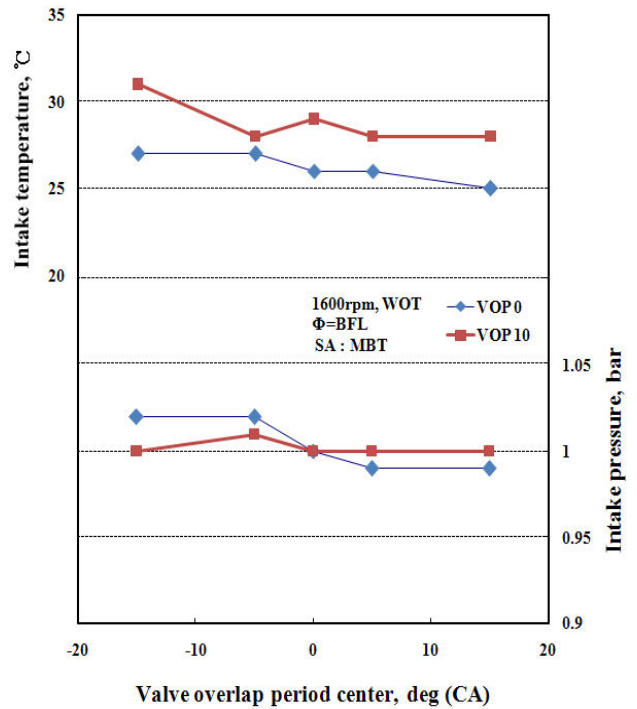


Fig. 6 Intake temperature and pressure versus valve overlap period center

여 나타낸 것이다. 여기서 측정치의 연료공기당량비는 역화한계당량비이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡기 온도와 흡기 압력은 VOP center가 지각됨에 따라 약간 차이가 있지만 전반적으로 감소하는 경향이다. 이러한 경향은 잔류가스량 증가에 의해 흡입공기량과 연소실 온도가 감소할 것이라 판단된다.

Fig. 7은 VOP 0° CA에서 VOP center가 변화할 때 공급된 흡입공기량을 VOP 10° CA와 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 6에서 예측한 바와 같이 VOP center가 TDC를 기준으로 지각됨에 따라서 흡입공기량은 두 경우 모두 점차 감소하며 진각하면 미소하게 증가하는 대체로 일정한 것으로 볼 수 있다. VOP 0° CA인 경우 VOP center TDC와 15° BTDC에서의 흡입공기량은 약 1.7%정도의 미미한 차이가 있는데 반해 역화한계 당량비는 약 69%정도의 차이를 보인다. 그리고 각각의 VOP center에서 VOP 10° CA인 경우의 흡입공기량이 VOP 0° CA인 경우보다 약간 증가하는 경향이다. 그러나 그 차이는 그리 크지 않으므로 VOP

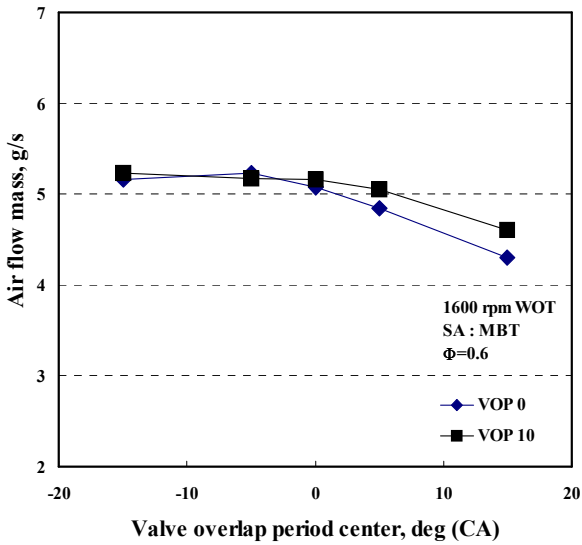


Fig. 7 Comparison of air flow mass of each valve overlap periods

center 15° BTDC부터 TDC까지는 대체적으로 동일하다고 볼 수 있다. 특히 VOP center가 TDC일 때 VOP 0° CA와 VOP 10° CA의 흡입공기량의 차이는 약 1.8%정도인데 반해 역화한계당량비는 약 43%의 차이를 보이고 있다.

흡입공기량의 변화는 공급열량의 변화와 동일하고, 공급열량은 연소실 온도에 비례한다. 또한 연소실 온도가 증가할수록 역화에 관계되어 있는 조기착화의 발생이 용이해진다. 하지만 상기와 같은 흡입공기량의 미소한 차이는 TDC보다 VOP center를 진각시킨 경우의 역화한계 당량비의 감소와 VOP 10° CA보다 VOP 0° CA경우의 역화한계 당량비가 전반적으로 큰 것을 설명하기 용이하지 않다.

Fig. 8은 VOP 0° CA에서 VOP center 변화에 대한 실린더 내 압력 변화와 VOP 10° CA에서 VOP center가 TDC 일때의 실린더 내 압력 변화를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 실린더 내 가스의 최고압력은 높은 순서대로 범례에 표시하였으며 VOP 10° CA인 경우의 VOP center TDC는 범례 끝부분에 표시하였다.

실린더 내 가스압력은 연소실 가스 온도에 비례하고, 공급열량과 마찬가지로 연소실 온도는 연소

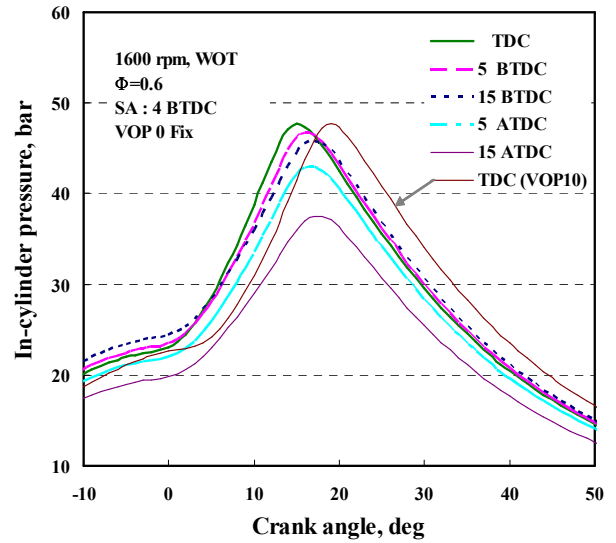


Fig. 8 Comparison of in-cylinder pressure of each valve overlap period center and valve overlap period

실 가스 온도에 좌우된다. 실린더 내 가스의 최고 압력은 VOP 0° CA에서 VOP center TDC일때 가장 높고 이보다 진각되거나 지각될수록 점차 감소하는 경향을 보인다. 특히 VOP center가 15° BTDC인 경우 실린더 내 가스 최고압력이 TDC인 경우보다 낮으므로 역화한계 당량비가 증가할 것으로 예측된다. 그럼에도 불구하고 Fig. 3에 나타난 바와 같이 VOP center 15° BTDC인 경우가 TDC인 경우보다 역화발생이 오히려 잘 일어난다. 이 경우 역화한계 당량비의 차이는 약 69%정도 이른다. 동일한 VOP center TDC인 경우 VOP 0° CA와 VOP 10° CA의 실린더 내 최고압력은 거의 동일한 것으로 볼 수 있다. 따라서 역화한계 당량비가 비슷할 것으로 예측되지만 역화한계 당량비는 약 43%정도 차이가 난다. 상기의 결과는 역화가 VOP center 변화에 따른 실린더 내의 가스압력, 즉 연소실의 온도에 직접적인 영향을 받지 않는다는 것을 의미한다.

VOP 0° CA인 경우 역화가 억제된 시점은 VOP center가 TDC로써 흡기밸브 열림시기와 배기밸브 닫힘시기가 모두 TDC인 경우이다. 또한 VOP 10° CA인 경우 VOP center가 5° ATDC부터 역화가 억제되는데 이때의 흡기밸브 열림시기는 TDC이

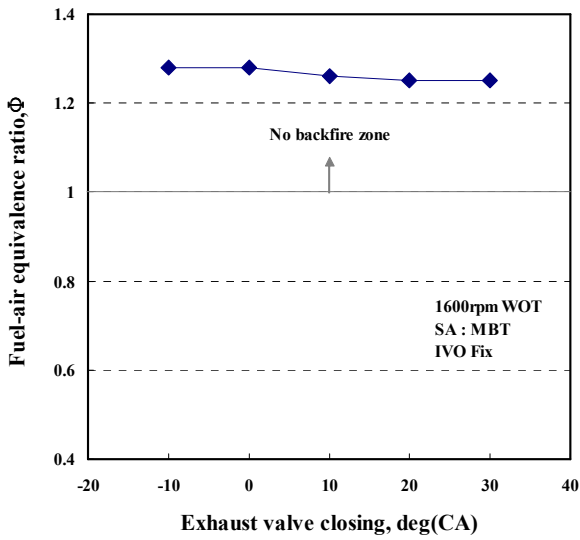


Fig. 9 Fuel-air equivalence ratios versus exhaust valve closing

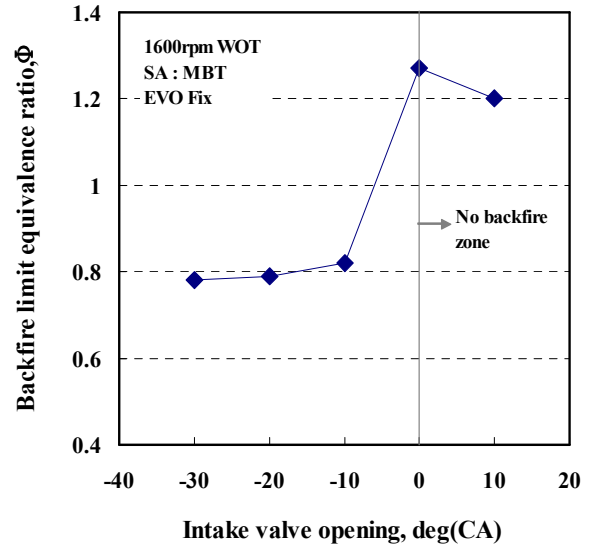


Fig. 10 Backfire limit equivalence ratios versus intake valve opening

고 배기밸브의 닫힘시기가 10° ATDC이다. 따라서 Fig. 3에서 VOP center와 VOP 변화시의 역화 한계 당량비 확장은 흡기밸브 열림시기가 지각되는데 따른 역류가능성의 감소에 의한 것으로 볼 수 있다. 이를 파악하기위해 흡기밸브 열림시기를 TDC에 고정시키고 배기밸브 닫힘시기의 변화를 다음과 같이 확인하였다.

한계 당량비를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 흡기밸브 열림시기가 피스톤의 상향운동시 다시 말해 TDC보다 진각되어 있는 경우 역화가 일어났지만 지각되어있는 경우는 마찬가지로 역화가 일어나지 않았다⁷⁾. 상기의 결과는 역화발생을 근본적으로 해결하기 위해 흡기밸브 열림시기를 피스톤 하향운동시인 TDC부터 지각시키면 역화를 역

3.3 흡기밸브 열림시기와 역화억제

Fig. 9은 흡기밸브 열림시기가 TDC로 동일한 조건에서 배기밸브 닫힘시기를 변화(IVO의 시기가 TDC이므로 EVC 변화는 VOP 변화와 동일)시킨 경우의 각각의 연료공기 당량비를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 배기밸브 닫힘시기 변화에 따라 밸브 오버랩 기간이 증가되거나 감소되어도 역화가 일어나지 않는 것을 보이고 있다. 상기의 결과는 밸브 오버랩기간의 유무와 VOP center의 위치에 관계없이 흡기밸브 열림시기가 피스톤 하향운동시기에 있어 실린더에서 흡기계로 모종의 점화원의 역류를 유발하는 가능성을 배제시키는 중요한 인자라는 것을 보이는 것이다.

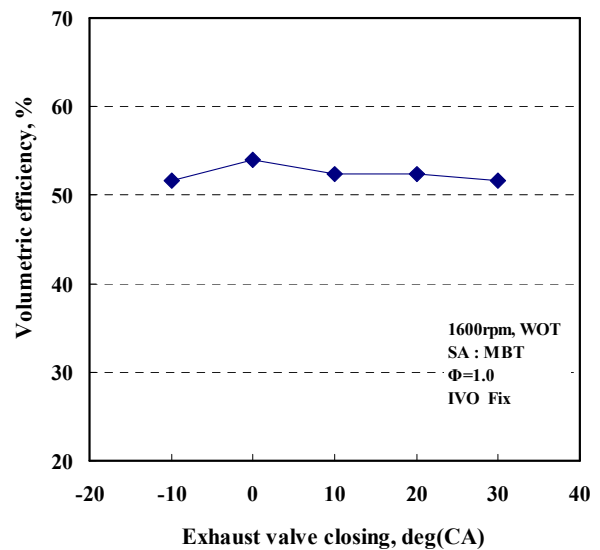


Fig. 11 Volumetric efficiency versus exhaust valve closing

Fig. 10은 배기밸브 닫힘시기를 10° ATDC에 고정시킨 뒤 흡기밸브 열림시기 변화에 대한 역화

제할 수 있다는 것을 보여준다.

3.4 제반성능

Fig. 11은 연료공기 당량비가 1.0인 경우, 흡기 밸브의 열림시기를 피스톤이 하향운동을 시작하는 TDC에 고정을 시킨 뒤 배기밸브의 닫힘시기 변화에 대한 공급열량을 확인하기 위해 체적효율을 나타낸 것이다.

배기밸브의 닫힘시기를 10° BTDC부터 30° ATDC까지 변화한 결과 체적효율은 배기밸브 닫힘시기가 TDC일때 가장 높고 이보다 진각 및 지각시 약간 감소하는 경향을 보이고 있다.

흡기밸브 열림시기를 TDC에 고정시킨 뒤 배기밸브 닫힘시기 변화에 따른 정미토크와 정미열효율을 나타낸 것이 Fig. 12이다. 배기밸브의 닫힘시기가 TDC부근에서 정미토크와 정미열효율이 가장 높으며 이보다 진각될 때는 감소를 하고 지각될 때는 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타낸다.

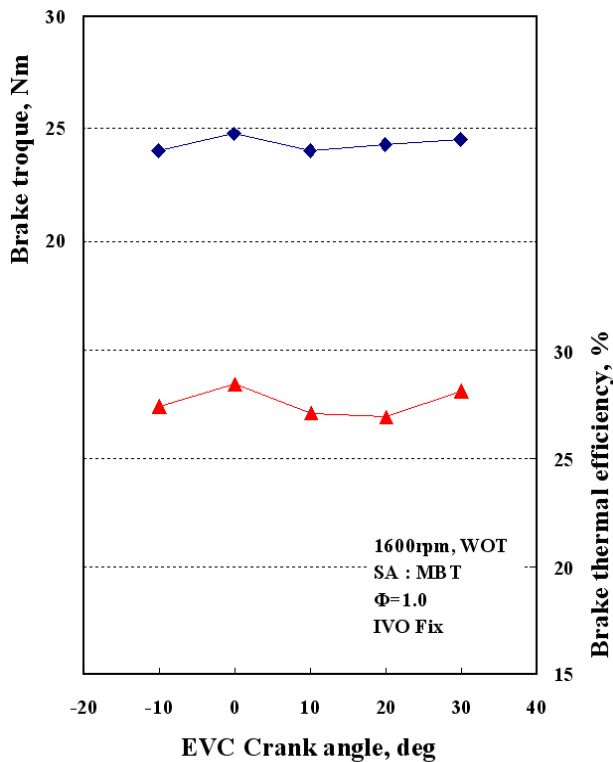


Fig. 12 Brake torque and brake thermal efficiency versus exhaust valve closing

이 결과는 지각시의 체적효율 경향과 다른 것을 나타낸다. 흡기밸브 열림시기가 TDC에서 밸브 오버랩기간이 증가할수록 공급열량이 감소하는 반면에 배기밸브 닫힘시기가 늦어져 실린더 내의 난류 강도 및 유동속도가 변화하여 연소속도에 영향을 미칠 수 있다. 그 결과 연소촉진에 의해 정미열효율이 높아져서 정미토크가 높아지는 것이라 생각된다. 배기밸브 닫힘시기가 10° BTDC인 경우에는 언더 밸브 오버랩기간에 따른 체적효율의 감소에 기인하여 토크가 감소되는 경향을 보인다.

4. 결 론

역화한계 당량비가 높은 밸브 오버랩기간 0° CA와 10° CA에서 밸브 오버랩기간의 중심점을 변화시킨바 역화한계 당량비는 VOP center가 진각될수록 감소하며 지각됨에 따라 증가하는 것이 보여졌다. 그리고 각각의 밸브 오버랩기간에서 역화가 억제된 시점이 흡기밸브 열림시기가 TDC이므로 IVO를 TDC에 고정시켜놓고 배기밸브 닫힘시기를 변화시킨 결과 역화가 발생되지 않았다. 이것은 밸브 오버랩기간의 유무와 VOP center의 위치가 중요한 것이 아니라 흡기밸브 열림시기가 피스톤 하향운동시기에 존재함에 따라 역화를 억제하는데 기인하는 것을 의미한다.

최대정미토크와 최대정미열효율은 배기밸브 닫힘시기가 TDC일때, 즉 밸브 오버랩기간이 없을 때 가장 높게 나왔다.

상기와 같이 흡기밸브 열림시기의 위치에 의한 역화억제 가능성을 확인하였지만 본 실험은 제한적인 조건이기 때문에 추후 부하 및 기관회전수를 변화하는 등 다양한 운전조건을 통해 최적 밸브타이밍 검토가 필요한 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) J. M. Kim, Y. T. Kim, J. T. Lee, S. Y. lee, "Performance characteristics of Hydrogen Fueled Engine with the Direct Injection and

- Spark Ignition System”, SAE 952488, 1995, pp. 162-175.
- 2) 이창욱, 오태석, 김윤영, 이종태, “수소기관의 역화발생에 미치는 crevice volume의 영향에 관한 연구”, 대한기계학회 추계학술대회 논문집(II), 1996, pp. 646-651.
 - 3) K. Koyanagi, M. Hiruma, S. Furuham, “Study on Mechanism of Backfir in Hydrogen Engines”, SAE 942035, 1994.
 - 4) Huynh Thanh Cong, 강준경, 노기철, 이종태, “흡기관 분사식 수소기관의 밸브오버랩기간 변화에 대한 기관성능 및 연소특성 해석에 관한 연구”, 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, 2007, pp. 1936-1941.
 - 5) T. C. Huynh, J. K. Kang, N. C. Noh, J. T. Lee, J. H. Lee, "Feasibility of Backfire Control and Engine Performance with Different Valve Overlap Period of Hydrogen-Fueled Engine with External Mixture", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 18, No. 1, 2007, pp. 67-74.
 - 6) 강준경, T. C. Huynh, 노기철, 이종태, “흡기관 분사식 수소기관의 실용화를 위한 MCVVT 연구용 수소기관의 개발과 기본 특성”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 17, No. 3, 2006, pp. 255-262.
 - 7) 이재욱, 이택현, 신영기, 전광민, “스파크 점화기관에서 밸브타이밍에 따른 잔류가스율 측정 및 잔류가스율이 연소특성에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, 2000, pp. 126-131.