Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.11, No.1, 2003

냉각수 공급방식 및 국부적인 물통로의 형상 변화에 따른 냉각수 유동특성 및 연소실 벽면의 냉각효과

위 신 환[1] · 민 영 대[1] · 이 종 태[*2]

성균관대학교 대학원[1] · 성균관대학교 기계공학부[*2]

Coolant Flow Characteristics and Cooling Effects in the Cylinder Head with Coolant Flow System and Local Water Passage

Shinwhan Wei[1] · Youngdai Min[1] · Jongtai Lee[*2]

[1]*Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Sungkyunkwan University, Gyeonggi-do 440-746, Korea*

[*2]*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi-do 440-746, Korea*

(Received 9 September 2002 / Accepted 19 November 2002)

Abstract : For the countermeasure of expected higher thermal load in miller cycle engine, coolant flows in the cylinder head of base engine with several coolant flow methods and drilled hole passages were measured by using PIV technique. And the cooling effect was evaluated by measurements of wall temperatures according to each coolant flow method. It was found that the series flow system was most suitable among the discussed 3 types of coolant flow methods since it had the best cooling effect in cylinder head by the fastest coolant flow velocity. It was also found that for drilled water passage to decrease the large thermal load in exhaust valve bridge, nozzle type is more effective compared with round type of water passage, and its size has to be determined according to the coolant flow pattern and velocity in each cylinder.

Key words : Visualization of coolant flow(냉각수 유동가시화), Coolant flow method(냉각수 공급방식), Exhaust valve bridge(배기밸브 브릿지), Drilled water passage(드릴가공 물통로), Particle image velocimetry(PIV 기법)

1. 서 론

저압축 고팽창비 기관의 열적 설계를 위해 저자들은 base 기관이 되는 DOHC 가솔린 기관 실린더헤드의 열부하를 측정하고, 냉각수 유동을 가시화하였다.[1,2] 그 결과, 배기밸브 브릿지부는 큰 열부하에도 불구하고 물통로의 복잡한 기하학적 형상에 의해 유동이 빈약하며 각 실린더간 유동 편차가 크므로 이에 대한 대책이 요구됨을 밝힌 바 있다.

통상 기관의 냉각수 공급방식은 실린더블록에 설치된 물펌프로부터 냉각수를 유입시켜 헤드로 흐르게 하는 series flow방식을 채택하고 있다.[3] 최근 열부하가 큰 실린더헤드의 냉각효과 증대를 도모하기 위해 냉각수 입구를 실린더헤드에 설치하여 저온의 냉각수를 헤드에 먼저 유입시키는 reverse series flow 방식과 유속 및 압력손실의 저감을 위해 냉각수를 실린더헤드와 블록으로 나누어 공급하는 parallel flow 방식이 일부 거론되고 있다. 기관의 열부하 대책을 확립하기 위해서는 상기의 냉각수 공급방식에 따른 열부하 특성에 대한 비교해석이 요구된다. 그러나 냉각

*To whom correspondence should be addressed.
jtlee@yurim.skku.ac.kr

수 공급방식 차이에 따른 연소실 벽면의 냉각효과에 대한 비교 해석은 아직 미진한 상황이며, 특히 냉각수의 유동양상 및 유동특성을 공간적으로 상세히 해석한 결과는 아직 제시되고 있지 않다.

한편 인젝터 보스부나 배기밸브 시트부와 같이 열부하가 집중되는 부위에는 드릴가공 물통로 등과 같은 국부적인 물통로를 설치하는 방안이 사용되고 있다.[4,5] 물통로의 크기 및 형상은 냉각수 유량 및 유동 특성을 변화시켜 연소실 벽면의 열부하에 영향을 미친다. 그러나 국부적인 물통로가 설치된 냉각수 통로내의 공간적인 유동 특성의 해석으로부터 물통로의 적정 크기 및 형상을 결정한 연구는 명확히 보고되어 있지 않다.

본 연구에서는 고부하시 열적장애가 예측되는 저압축 고팽창비기관의 연소실내 열부하 대책을 강구하기 위하여, base 기관의 실린더헤드를 대상으로 냉각수 공급방식 및 국부적인 물통로의 형상변화에 따른 냉각수의 유동 양상 및 유동특성을 PIV 기법으로 가시화하여 냉각효과를 비교, 해석하였다. 그리고 발화운전시 실린더헤드의 벽면온도를 측정하여 각 냉각방식에 따른 냉각효과를 명확히 하였다. 해석에는 DOHC 형상을 갖는 실린더헤드에서 열부하가 가장 큰 배기밸브 브릿지부의 냉각수 유동특성 및 벽면온도에 관심을 집중하였다.

2. 냉각수 유동가시화 장치 및 방법

2.1 냉각수 유동가시화 장치

Fig. 1은 냉각수 유동가시화를 위한 실험장치의 실물사진을 나타낸 것이다. 실험 장치는 크게 실린더헤드부의 냉각수 유동가시화장치, 냉각수 및 추적입자 순환장치, PIV시스템으로 구성된다.

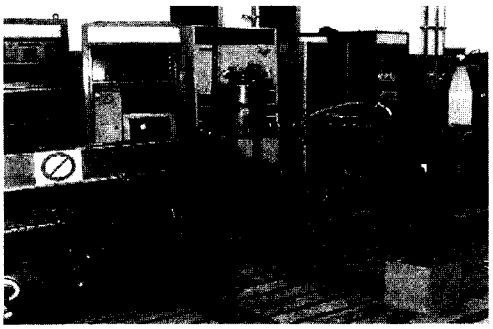


Fig. 1 Photograph of experimental setup for coolant flow visualization by using PIV

실린더헤드부의 냉각수 유동가시화장치는 실린더헤드 가시화부, 실린더블록, 물펌프로 구분할 수 있다. 실린더헤드 가시화부는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 실린더헤드내 냉각수 유동을 전반적으로 가시화하고, 열부하가 집중되는 배기밸브 브릿지부 냉각계의 유동특성을 상세히 파악할 수 있도록 하였다.[2] 실린더헤드의 상부는 최대의 관측면적을 확보하도록 물통로 위치까지 절단하고 아크릴 재질의 가시화창을 설치하였다. 흡기쪽 냉각수 통로내에는 반사경을 설치하여, 레이저 시트빔이 열부하가 큰 스파크플러그 및 배기쪽을 중심으로 실린더헤드의 물통로 전반에 입사될 수 있도록 하였다. 배기밸브 브릿지부는 냉각수 통로의 복잡한 기하학적 형상으로 인해 광원입사가 어려우므로 스파크플러그 보스부를 제거하고 삽입한 원통형 유리내에 타원형의 반사경을 설치하여 광원을 입사시켰다. 타원형 반사경은 브릿지부 유동을 공간적으로 파악할 수 있도록 회전 및 높이 조절이 가능하게 하였다.

실린더헤드 가시화장치의 실린더헤드와 블록부에는 Fig. 3과 같이 냉각수의 입출구를 변화시킴으로서 기관내 냉각수 공급방식을 변화시킬 수 있도

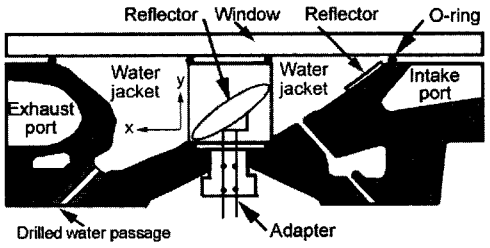
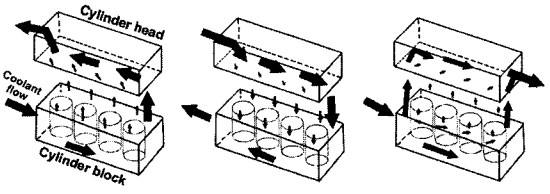


Fig. 2 Coolant flow visualizing part in the cylinder head



(a) Series flow (b) Reverse series flow (c) Parallel flow

Fig. 3 Coolant flow pattern at each coolant flow system

록, 다양한 위치에 냉각수의 입출구를 설치하였다. Fig. 3(a)는 기관 본래의 냉각수 공급방식인 series flow 방식으로 냉각수가 실린더블록과 헤드를 차례로 통과하도록, 냉각수 입구를 1번 실린더의 블록에 위치시키고, 출구는 동일 실린더의 헤드에 설치하였다. Fig. 3(b)는 reverse series flow 방식으로 저온의 냉각수를 먼저 열부하가 큰 실린더헤드에 유입시킴으로서 실린더헤드의 냉각효과의 증대를 도모하고자, 냉각수 입출구를 series flow 방식과 반대로 설치하였다. 냉각수가 실린더블록과 헤드를 차례로 흐르게 되면, 엔진내 냉각회로가 길어져 유동저항의 증대로 인한 유속 및 압력 손실이 증가된다. Fig. 3(c)는 parallel flow 방식으로 유동저항을 감소시키고자, 냉각수를 실린더헤드와 블록으로 동일하게 분배하여 평행하게 흐르게 하였다. 이 방식의 냉각수 입구는 1번 실린더의 블록과 헤드에 각각 설치하고, 출구는 4번 실린더의 헤드에 설치하였다.

국부적인 물통로는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 DOHC 실린더헤드에서 열부하가 가장 큰 배기밸브 브릿지부의 끝단에 설치하여 냉각수가 실린더블록으로부터 직접 유입되도록 하였다. 그리고 물통로의 크기 및 형상을 용이하게 바꿀 수 있도록 국부적인 물통로부를 아답터 형태로 제작하였다. 물통로의 크기는 내경 ϕ3.5에서 ϕ5.5mm까지 변화시켰다. 물통로 형상은 드릴가공 물통로로 통상 사용되는 원통형과 노즐효과에 의한 유동강화를 파악하고자 직경비 2 : 1의 축소노즐형으로 하였다.

냉각수 순환펌프는 기관에 장착된 기존 물펌프를 사용하였으며, DC 모터로 구동하였다. 냉각수출구에는 운전조건에 따른 유량을 변화시키기 위해 밸브와 전자유량계(S31-LM)를 설치하였다. 추적입자는 직경 150μm, 비중 1.1의 PVC입자를 사용하였고, 교반기가 설치된 냉각수 및 추적입자 순환장치에 의해 균일하게 교반된다.

PIV 시스템은 5W Ar-ion 레이저 광원, 연속광의 단속용 chopper, 광학계, 화상취득 및 처리장치로 구성된다. 유동장 촬영에는 스틸카메라와 zoom렌즈, bellows를 사용하였다. 촬영된 유동장의 화상은 image scanner에 의해 컴퓨터에 입력하고 처리하였다.

2.2 냉각수 유동가시화 방법

냉각수 유동가시화 실험은 전술한 바와 같은 기관내 냉각수 공급방식과 국부적인 물통로 설치 유무 및 형상을 변수로 배기밸브 브릿지부를 포함한 실린더헤드의 물통로내 냉각수 유동을 PIV기법으로 가시화 하는 것이다.

실린더헤드 물통로내 냉각수의 전반적인 유동은 레이저의 시트빔을 반사경에 투사하여 가시화 하고자 하는 임의 위치에 반사시키고 실린더헤드 상면의 가시화창을 통해 가시화 하였다. 배기밸브 브릿지부의 냉각수 유동은 브릿지부의 유동을 공간적으로 해석하기 위해 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 다차원적으로 가시화 하였다. x축 단면의 유동은 냉각수의 횡류를 파악하기 위해 브릿지부의 하부에서 상부까지 10mm간격의 세 단면을 가시화 하였다. y축 단면의 유동은 상승류를 측정하기 위해 밸브시트 부근, 스파크플러그 부근 및 그 중간지점의 세단면을 15mm간격으로 가시화 하였다. 각 실험에서 냉각수 유량은 발화운전시 기관운전조건에 따른 유량측정치를 적용하였다.

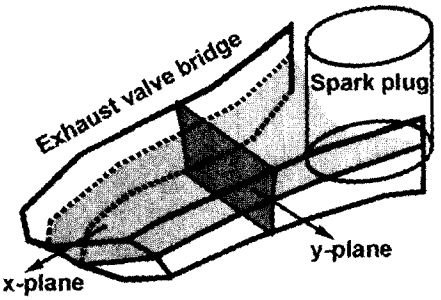


Fig. 4 Visualizing surface in the exhaust valve bridge

3. 냉각수 공급방식 및 국부 물통로 설치에 따른 유동강화 효과

3.1 냉각수 공급방식 변화에 대한 검토

3.1.1 실린더헤드내 냉각수 유동가시화

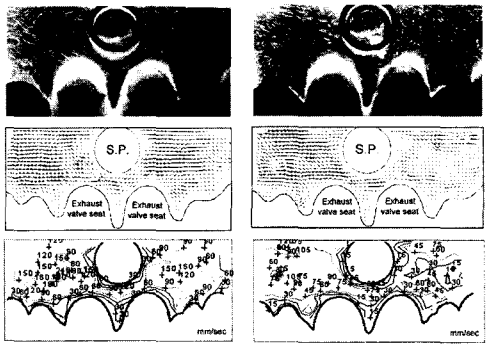
Fig. 5는 3번 실린더의 냉각수 유동 가시화결과와 이로부터 구한 속도벡터 및 등속도 분포를 나타낸 것이다. 여기서 냉각수 공급방식은 기관내 냉각회로의 길이가 동일한 series flow 방식과 reverse series flow 방식이다. Parallel flow 방식은 실린더헤드와

블록으로의 유량분배로 인해 실린더헤드내 유속이 상대적으로 매우 느려져 정체되므로 본 비교 해석에서 제외하였다. 상당기관회전수는 1500rpm이다.

가시화 사진에서 냉각수의 유동속도를 나타내는 흰 선은 두 냉각수 공급방식 모두 스파크 플러그 보스부가 위치한 중앙부가 전반적으로 길며, 사진 하단의 배기쪽의 경우 헤드볼트 및 밸브시트 주변에서 짧은 것을 보인다. 냉각수 공급방식에 따른 흰 선의 길이는 series flow 방식의 경우가 reverse flow 방식의 경우 보다 전반적으로 긴 경향이다.

유동 방향 및 크기를 정량적으로 나타내는 속도벡터장에서 보는 바와 같이 series flow 방식의 유동은 냉각수 공급방식에 따라 예측되는 주유동 방향과 동일하게, 주로 오른쪽에서 왼쪽으로 흐르며, reverse flow 방식은 이와 반대방향으로 흐른다. Series flow 방식의 유속은 주유동 방향인 오른쪽에서 왼쪽으로 갈수록 실린더블록으로부터의 냉각수 유입에 따른 유량 증가로 빨라지는 경향이다. 그러나 reverse series flow 방식의 유속은 주유동 방향인 왼쪽에서 오른쪽으로 갈수록 실린더블록으로의 냉각수 유출로 감소한다. 배기밸브 시트 주변의 유속은 그 부근 냉각수 통로의 기하학적 형상의 복잡성으로 인해 주위 유동에 비하여 느린 경향이다. 특히 reverse series flow 방식의 경우 왼쪽 밸브시트 주변에서 느린 재순환 유동이 형성되며, 오른쪽 영역에서 유동정체가 넓은 영역에 걸쳐 형성됨을 보인다.

유속의 분포는 등속도 분포에서 보는 바와 같이 두 냉각수 공급방식 모두 스파크플러그 주변에서 전반적으로 크며, 이는 냉각수의 주유동이 스파크 플러그 주변에 존재한다는 것을 의미하는 것이다. 동일 지점에서의 유속은 유동정체 및 느린 재순환 유동의 생성에 기인하여 reverse series flow방식의 경우가 series flow 방식에 비해 전반적으로 약 1/2 수준이다.



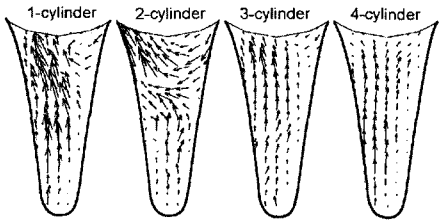
(a) Series flow system (b) Reverse series flow system

Fig. 5 The results of coolant flow visualization, velocity vector field and equi-velocity contour of coolant in cylinder head

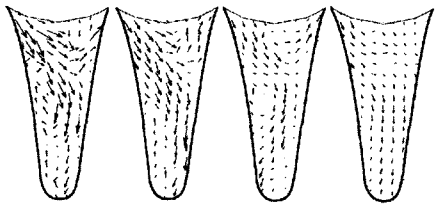
특히 배기밸브 브릿지부의 유속은 두 개의 배기밸브 시트부에 위치함에 따른 기하학적 형상으로 인해 상기 냉각수 공급방식 모두에서 다른 지점에 비해 현저히 빈약함을 나타낸다. DOHC 실린더헤드에서 열부하가 가장 큰 배기밸브 브릿지부의 냉각수 유동을 다음과 같이 상세히 해석하였다.

3.1.2 밸브브릿지부 냉각수 유동가시화

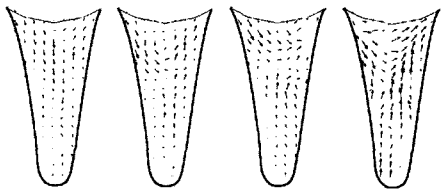
Fig. 6은 배기밸브 브릿지부 x축 단면의 유동을 국부적으로 가시화하여 속도벡터를 냉각수 공급방식에 대해 나타낸 것이다. 여기서 상당기관회전수는 3000rpm이다.



(a) Series flow system



(b) Reverse series flow system



(c) Parallel flow system

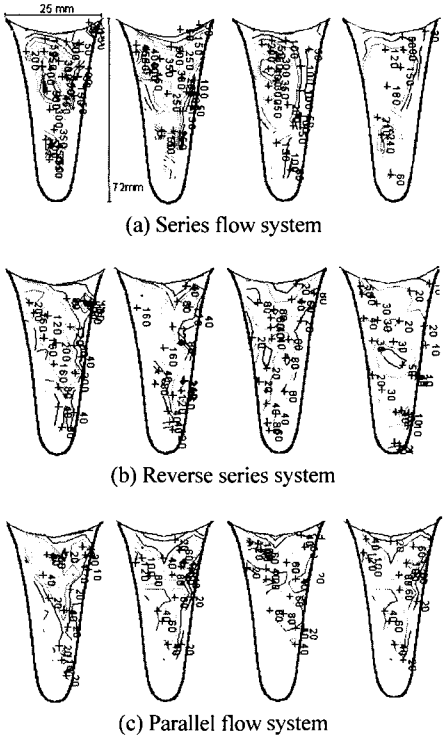
Fig. 6 Velocity vector field of each exhaust valve bridge at each coolant flow system

배기밸브 브릿지부의 유동 방향 및 크기는 그림에서 보는 바와 같이 냉각수 공급방식에 따라 현저히 차이를 보인다. Series flow 방식의 속도벡터는 실린더블록으로부터 유입되는 상승류에 의해 브릿지부의 끝단에서 스파크 플러그부로 향하는 유동이 생성된다. 이 유동은 인접실린더로부터 유입된 유동에 흡수되어 스파크플러그 부근의 왼쪽으로 빠져나가는 양상이다. 유동의 크기는 냉각수의 주유동 방향인 4번에서 1번 실린더로 갈수록 실린더블록으로부터의 냉각수 유입에 따른 유량증대로 증가하는 경향이다. Reverse series flow 방식의 유동방향은 series flow 방식과 반대로 스파크 플러그부에서 브릿지부 끝단으로 진행되는 양상이다. 각 브릿지별 유동은 주유동 방향인 1번에서 4번 실린더로 갈수록 실린더블록으로의 냉각수 유출로 감소하며, 주위 유동보다 느린 작은 와류의 재순환 유동이 브릿지부에 형성됨을 보인다. Parallel flow 방식의 속도벡터는 실린더블록으로부터의 상승류에 의해 형성된 브릿지부 끝단의 유동과 인접 실린더로부터 유입된 유동이 브릿지부 내에서 충돌하여 유동정체가 발생되고 있다. 각 실린더별 속도벡터의 크기는 주유동 방향인 1번에서 4번 실린더로 갈수록 증가하는 경향이나 2, 3번 실린더에서 거의 유사한 크기를 나타낸다.

상기 속도벡터로부터 구한 배기밸브 브릿지부의 등속도 분포를 냉각수 공급방식에 대해 나타낸 것이 Fig. 7이다.

배기밸브 브릿지부의 유속은 전반적으로 series flow 방식의 경우가 가장 크며, 밸브 브릿지부 끝단까지 큰 유속이 대체로 유지됨을 보인다. Parallel flow 방식의 유속은 냉각수가 실린더헤드와 블록으로 분배됨에 따른 유량감소에 기인한 유속감소와 유동정체로 가장 작은 값을 보이며 특히 브릿지부 끝단의 경우 거의 유속이 없다. Reverse series flow 방식은 상기 두 방식의 중간 정도의 경향이다. 유동정체와 재순환 유동의 생성은 냉각수로의 열전달을 감소시켜 연소실 벽면의 국부적인 열부하증대 및 불균일 온도분포의 원인이 되므로 냉각수 공급방식에 따른 유속의 크기 및 실린더별 유동불균일 정도를 파악하였다.

Fig. 8은 각 배기밸브 브릿지부의 공간평균유속을 각각의 냉각수 공급방식에 대해 나타낸 것이다. 여기서 공간평균유속은 속도벡터 및 등속도분포에 나타낸 각 그리드 점의 RMS (Root Mean Square) 속도를 상기 브릿지부의 그림 영역에 걸쳐 공간 평균



(a) Series flow system

(b) Reverse series system

(c) Parallel flow system

Fig. 7 Equi-velocity contour of each exhaust valve bridge at each coolant flow system

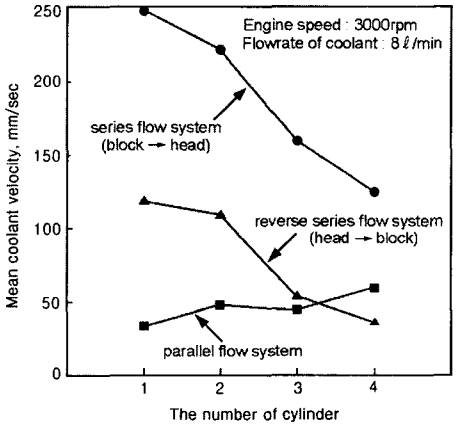


Fig. 8 Mean coolant velocity at exhaust valve bridge for each coolant flow system

한 값이다.

Series flow 방식의 공간평균유속은 전술한 바와 같이 냉각수의 주유동 방향인 4번에서 1번 실린더로 갈수록 실린더블록으로부터의 냉각수 유입으로 증가하는 경향이다. Reverse series flow 방식의 평균유속은 이와 반대로 감소하며, parallel flow 방식의 평균유속은 주유동 방향인 1번에서 4번 실린더로 갈수록 약간 증가하는 경향을 나타낸다.

공간평균유속은 series flow 방식이 다른 공급방식에 비해 약 2배 이상 크지만, 실린더간 유속편차도 약 2배 정도로 큰 값을 보인다. Parallel flow 방식의 평균유속은 작지만, 실린더간 유속편차는 실린더간 유량이 대체로 일정하고 냉각회로가 짧은데 기인한 유동저항의 감소로 가장 작다. Reverse series flow 방식의 평균유속은 상기방식의 중간 정도이고 실린더간의 유속편차는 series flow 방식과 유사한 크기를 보인다. 이와 같은 유속 감소는 저온의 냉각수가 공급되는데 따른 냉각증가 효과를 현저히 저하시킬 것으로 생각된다.

상기 결과에 나타낸 바와 같이 배기밸브 브릿지부의 유동강화에는 series flow 방식이 유리하나, 실린더간 유속편차는 parallel flow 방식이 유리함을 알 수 있다. 배기밸브 브릿지부의 열부하저감에는 냉각수의 유동강화 여부가 지배적인 인자이지만 이와 함께 실린더간 열부하 편차를 가능한 감소시켜야 한다. Series flow 방식의 경우 4번에서 1번 실린더로 갈수록 냉각수 온도가 상승되는 것은 주유동 방향으로의 유속 증가에 의해 감소되어 실린더간 온도편차의 감소에 기여한다. 이로 인해 series flow 방식은 실린더간 열부하 편차를 감소시키는 효과를 어느 정도 수반할 것으로 생각된다. 그러나 근본적으로 각 배기밸브 브릿지부의 유속편차를 감소시키고 빈약한 유동을 강화시키는 방안이 필요함을 알 수 있다.

3.2 국부적 냉각수 공급법에 대한 검토

3.2.1 국부물통로 크기 변화시 유동강화

Fig. 9는 원통형 드릴가공 물통로의 크기 변화에 따른 배기밸브 브릿지부의 x축 하부단면의 등속도 분포를 나타낸 것이다. 여기서 냉각수 공급방식은 냉각수의 유속이 가장 큰 series flow 방식이다. 드릴가공 물통로는 유동강화 효과를 극대화하기 위해 상기 공급방식에서 유속이 가장 느린 4번 배기밸브 브릿지부에 설치하였다.

배기밸브 브릿지부의 유동은 브릿지부 끝단에서 스파크플러그 쪽으로 진행되는 양상으로 드릴가공 물통로의 설치 및 크기 변화에 대해 동일한 경향을 보인다. 그러나 유속은 물통로의 설치 및 크기 증가에 따라 급격히 증가한다. 드릴가공 물통로를 설치하기 전에는 큰 유속을 갖는 영역이 중앙에 국부적으로 존재하지만, 물통로를 설치함에 따른 유동강화로 브릿지부의 중앙부에서 넓은 영역으로 확장되며 브릿지부 끝단의 유동정체도 크게 완화되고 있다. 또한 드릴가공 물통로 크기가 증가함에 따라 큰 유속을 갖는 영역이 브릿지부의 끝단과 벽면 근처를 제외한 전 영역으로 확장되는 경향을 보인다.

Fig. 10은 드릴가공 물통로의 크기 변화에 따른 배기밸브 브릿지부의 x축 각 단면의 공간평균유속

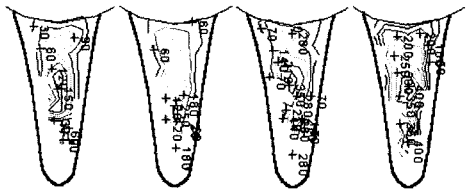


Fig. 9 Equi-velocity contour in the bottom of exhaust valve bridge for each water passage hole

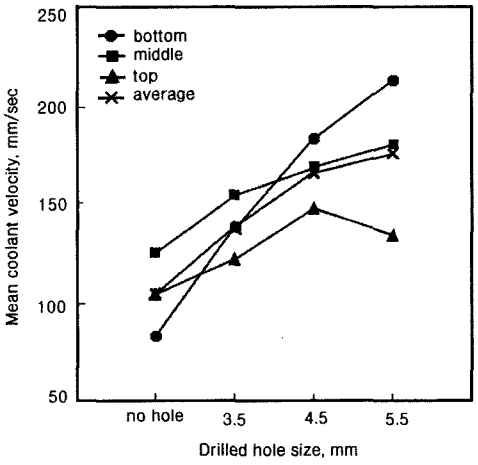
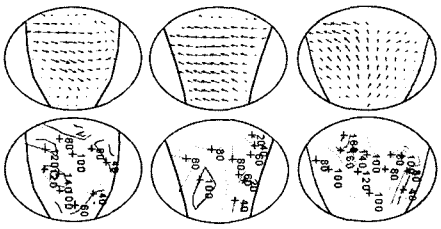


Fig. 10 Mean coolant velocity for water passage hole size

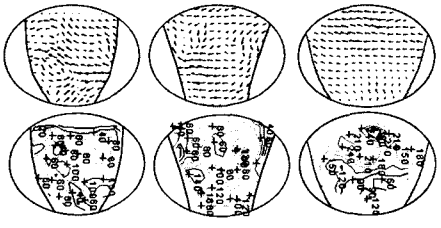
을 나타낸 것이다. 여기서 공간평균유속은 하부에서 상부까지 10mm 간격의 세 단면을 각 영역에 걸쳐 공간 평균한 것이다.

배기밸브 브릿지부 각 단면의 공간평균유속은 물통로의 크기가 증가됨에 따라 전반적으로 증가하며, 하부단면의 경우 드릴가공 물통로와 근접함에 따라 유동강화 효과가 가장 큼을 보인다. 그러나 물통로가 ϕ5.5mm인 경우에는 ϕ4.5mm의 경우에 비해 하부 및 중간단면의 유동이 강화될지라도 그 증가폭이 둔화되며, 특히 상부 유동은 주위의 유동변화로 오히려 감소하는 경향이다. 배기밸브 브릿지부의 드릴가공 물통로를 크게 하면 상기부분의 유속은 강화되나, 실린더헤드의 다른 지점의 유량감소로 열전달에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 배기밸브 브릿지의 물통로는 각 위치에서 평균속도가 모두 증가되는 적정 크기로 결정하는 것이 바람직하다. 물통로의 크기가 ϕ4.5mm인 경우 물통로 설치 전보다 평균 약 60% 정도의 유동증가 효과가 보여졌다.

Fig. 11은 드릴가공 물통로의 설치전후의 배기밸브 브릿지부의 y-축 단면의 속도벡터 및 등속도 분포를 나타낸 것이다. 여기서 물통로는 ϕ4.5mm의 원통형이다.



(a) Without drilled water passage



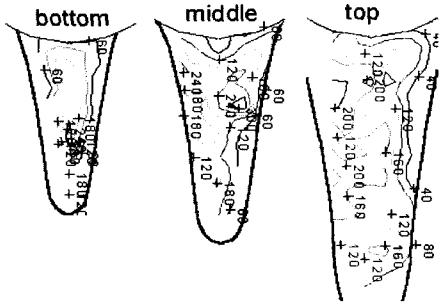
(b) With ϕ4.5㎜ drilled water passage

Fig. 11 Comparison of coolant flow for no drilled passage and ϕ4.5㎜ drilled water passage

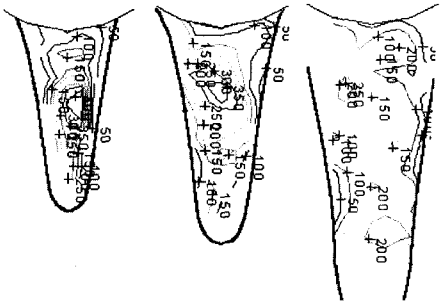
배기밸브 브릿지부의 y축 단면의 유동은 Fig. 9의 x축 유동과 달리 드릴가공 물통로를 설치함에 따라 강화될 뿐만 아니라 각 위치별로 유동형태에 큰 차이가 있다. 드릴가공 물통로를 설치한 경우의 유동은 물통로 설치에 따른 유동강화로 밸브시트부 및 중간단면에서 와류가 생성되며, 스파크 플러그 주변의 유동도 강화되는 경향이다. 또한 동일단면에서 각 위치에 따른 유속이 상대적으로 균일하게 된다. 유동강화 효과는 물통로가 설치된 브릿지부의 끝단 근처인 배기밸브 시트부에서 가장 큰 것을 보이고 있다. 드릴가공 물통로가 설치된 밸브시트 주변의 유동은 밸브시트를 따라 유입된 유동이 국부 물통로를 통해 유입된 유동과 만나면서 와류가 발생되며, 연소실 벽면과 하부까지 큰 유동이 분포함을 볼 수 있다.

3.2.2 국부 물통로 형상 변화시 유동강화

국부 물통로가 노즐형태로 제작되면 냉각수가 갖는 압력에너지가 속도에너지로 변환되어 유동이 강화될 것으로 생각된다. 이 효과를 검토하기 위하여 물통로 형상이 직경비 2 : 1의 축소 노즐형과 원통형인 경우의 등속도 분포를 Fig. 12에 나타낸다. 여기



(a) With nozzle-type drilled water passage



(b) With nozzle-type drilled water passage

Fig. 12 Comparison of equi-velocity contour for round-type and nozzle-type

서 측정단면은 하부에서 상부까지의 세 단면이며, 브릿지부 냉각수통로의 형상이 V형이므로 상부로 갈수록 가시화 영역이 넓어진다. 물통로의 선단 직경은 모두 ϕ3.5mm로 동일하다.

배기밸브 브릿지부 하부와 중간단면의 유속은 노즐형 물통로를 설치한 경우가 원통형 물통로에 비해 전반적으로 큰 것을 보인다. 평균유속은 노즐형인 경우가 원통형인 경우에 비해 하부에서 약 27%, 중간 단면에서 약 13% 증가하며, 상부에서는 거의 유사한 속도분포를 보인다. 배기밸브 브릿지부의 열부하는 연소실 벽면 근처인 하부의 유동에 크게 좌우되므로 상기와 같이 하부 단면에서 큰 유동증가를 보인 노즐형 물통로가 원통형 물통로에 비해 효과적임을 알 수 있다. 또한 배기밸브 브릿지간 열부하 편차는 국부적인 물통로의 크기뿐만 아니라 형상변화에 의해 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

4. 발화 운전시의 냉각효과 평가

4.1 냉각수 공급방식에 따른 냉각효과

냉각수 공급방식 및 국부적인 물통로의 형상 변화에 따른 실린더헤드 벽면의 냉각효과를 명확히 하고자 4번 배기밸브 브릿지에 벽표면 온도프로브를 삽입하여 발화운전시 벽표면온도를 측정하였다. 실험기관은 DOHC 가솔린기관으로 배기량은 1998 cc이며 압축비는 9.2이다. 온도프로브는 선행 연구에서 확립된 제작기술을 사용하여 제작하였다.[1,6,7]

Fig. 13은 냉각수 공급방식에 따른 배기밸브 브릿지부의 벽표면온도를 기관회전수 변화에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 기관부하는 50%이며, 냉각수 공급방식은 series 및 reverse series flow 방식으로 유동이 가장 빈약한 parallel flow 방식은 본 실험에서 제외하였다.

냉각수 공급방식에 따른 배기밸브 브릿지부의 벽표면온도는 기관회전수 증가에 따른 공급열량의 증대로 증가하며 증가구배는 현저한 차이를 보인다. 벽표면온도는 series flow 방식의 경우가 reveres series flow 방식의 경우에 비해 전반적으로 낮으며, 그 차이는 기관회전수의 증가에 따라 커짐을 보인다. 이는 series flow 방식의 유속이 reveres series flow 방식에 비해 약 2배 이상 큰데 기인한 냉각수로의 열전달 효과의 차이에 의한 것이다. 배기밸브 브릿지부의 벽표면온도는 series flow 방식의 경우가 reveres series flow 방식에 비해 기관회전수가 1500rpm에서 약 8℃ 정도, 3000rpm에서는 약 23℃ 정도 낮은 값을 보인다.

Fig. 14는 냉각수 공급방식에 따른 배기밸브 브릿지부의 벽표면온도를 기관부하 변화에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 기관회전수는 3000rpm이다.

배기밸브 브릿지부의 벽표면온도는 기관부하 증가에 따른 단위 사이클당 공급열량의 증가로 증가하는 경향이며, 두 냉각수 공급방식간의 벽표면온도의 차이도 현저히 증가함을 보인다. 벽표면온도

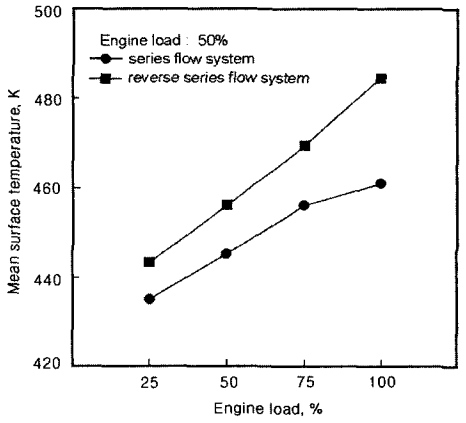


Fig. 13 Surface temperature as a function of engine speed for each coolant flow system

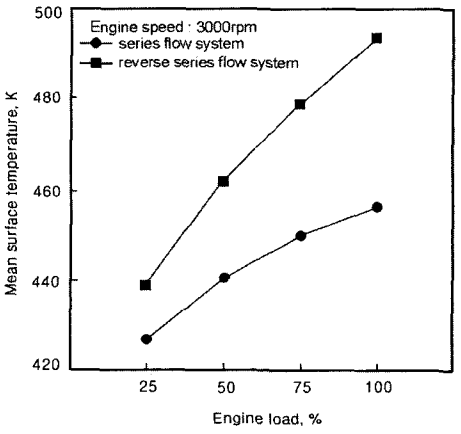


Fig. 14 Surface temperature as a function of engine load for each coolant flow system

는 series flow 방식의 경우가 reveres series flow 방식의 경우에 비해 전반적으로 낮고, 그 차이도 기관부하 증가에 따라 커짐을 보인다. 이는 reveres series flow 방식의 경우 상대적으로 느린 유속에 의한 유동정체 및 재순환 유동의 생성으로 저온의 냉각수를 공급시킴에 따른 실린더 헤드의 냉각효과가 현저히 상쇄되는데 기인하는 것이다.

배기밸브 브릿지부 벽표면온도는 series flow 방식의 경우가 reveres series flow 방식에 비해 기관부하가 25% 인 경우 약 12℃ 정도, 전부하 운전인 경우 약 38℃ 정도 낮은 값을 보인다.

상기와 같이 냉각수 공급방식에 따른 냉각효과를 기관하에서 검토한 결과도 냉각수 유동양상의 해석시 열부하 저감에 유리하리라 예측된 series flow 방식이 연소실 벽면의 열부하 저감에 더 유리함이 확인되었다.

4.2 국부물통로의 형상 변화시 냉각효과

Fig. 15는 드릴가공 물통로의 설치 및 형상변화에 따른 배기밸브 브릿지부의 벽표면온도를 기관부하 변화에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 냉각수 공급방식은 유동강화에 의한 냉각효과가 가장 우수한 series flow 방식이며, 물통로의 선단직경은 ϕ 3.5mm로 동일하다.

배기밸브 브릿지부의 벽표면온도는 드릴가공 물통로의 설치유무와 상관없이 기관부하가 증가함에 따라 증가하는 경향이다. 하지만 벽표면 온도는 원

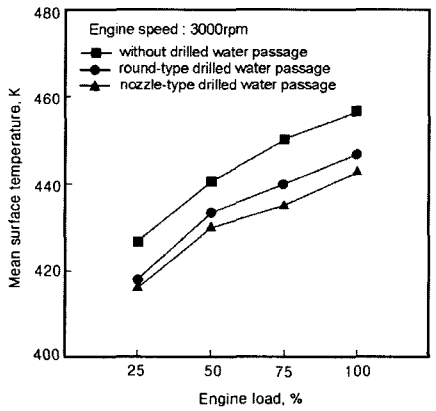


Fig. 15 Surface temperature as a function of engine load for each drilled water passage.

통형의 드릴가공 물통로를 설치한 경우 유동강화에 의한 냉각수로의 열전달 증가로 평균 약 10℃ 정도 저감되며, 그 저감 정도는 기관부하의 증가에 따라 약간 커지는 경향이다. 특히 드릴가공 물통로의 형상이 노즐형인 경우가 유동강화효과가 큰데 기인해 원통형인 경우 보다 약 5℃ 정도 더 저감되며, 물통로가 설치되지 않은 경우에 비해서는 평균 약 15℃ 정도 저감되는 효과를 보였다.

상기와 같이 열부하가 큰 배기밸브 브릿지부에 드릴가공 물통로를 설치함으로서 국부적으로 냉각효과를 증대시킬 수 있으며, 물통로 형상은 노즐형인 경우가 더욱 효과적임을 확인하는 것이다.

5. 결 론

저압축 고팽창비기관의 배기밸브 브릿지를 포함한 실린더헤드의 열부하 대책을 강구하기 위해, 냉각수 공급방식 및 국부적인 물통로 설치 및 형상변화에 따른 냉각수 유동을 가시화하고, 발화운전중의 벽표면온도를 측정하여, 그 효과를 비교 평가하였다.

그 결과, 냉각수 공급방식으로는 유동속도 측면에서 series flow 방식이, 실린더간 유동의 균일화 측면에서 parallel flow 방식이 유리하며 reverse series flow 방식은 상기방식의 중간 정도임이 보여졌다. 배기밸브 브릿지부에 국부 물통로를 설치한 경우 ϕ4.5mm가 적정 크기이며, 물통로 형상은 노즐형이 원통형보다 약 27% 정도 유동강화효과가 더 큼을 보였다.

기관하의 벽면온도 저감 효과는 series flow 방식이 reverse series flow 방식에 비해 최고 약 38℃ 정도 큼을 보였다. 또한 통상의 원통형 드릴가공 물통로를 설치함에 따른 온도의 저감효과는 약 10℃정도이며, 노즐형인 경우 약 5℃ 정도 더 저감되는 효과를 보였다.

상기 결과로부터 열부하가 큰 배기밸브 브릿지부에 드릴가공 물통로를 설치함으로서 국부적으로 냉각효과를 증대시킬 수 있고, 물통로 형상은 노즐형인 경우가 더욱 효과적임을 알 수 있었다. 또한 드릴가공 물통로의 크기는 주유동 방향 및 유동양상에 따라 실린더별로 차이를 두는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

References

1) J. W. Cho, Y. Ryu, J. T. Lee, "Measurement and

Analysis of Instantaneous Surface Temperature and Unsteady Heat Flux at Combustion Chamber of DOHC Gasoline Engine : Cylinder Head," Transactions of KSAE, Vol.7, No.1, pp10-19, 1999.

2) S. H. Wei, J. T. Lee, "Visualization of Coolant Flow in the Cylinder Head and Exhaust Valve Bridge for the Countermeasure of Thermal Loading in the DOHC Gasoline Engine," Transactions of KSAE, Vol.10, No.6, 2002.
3) H. E. Ellinger, J. D. Halderman, "Automotive Engines Theory and Servicing," 2nd ed. Prentice Hall Career & Technology Press, pp.88-111, 1991.
4) B.S. Min, J.K. Choi, "Effect of Coolant Flow Pattern on Metal Temperature of Combustion Chamber," Transactions of KSAE, Vol.1, No.1, 2002.
5) L. Kevin, "The Use of Flow Visualization and Computational Fluid Mechanics in Cylinder Head Cooling Jacket Development," SAE 891897, 1989.
6) Y. Ryu, S. W. Wei, J. T. Lee, "Measurement and Analysis of Instantaneous Surface Temperature and Unsteady Heat Flux at Combustion Chamber of DOHC Gasoline Engine ; Piston," Transactions of KSAE, Vol.7, No.2, pp.8-18, 1999.
7) S. W. Wei, J. T. Lee, "Measurement and Analysis of Instantaneous Surface Temperature and Unsteady Heat Flux at Combustion Chamber of DOHC Gasoline Engine Cylinder Liner," Transactions of KSAE, Vol.8, No.3, 2000.
8) A. Yuzo, "Numerical Simulation and Experimental Observation of Coolant Flow Around Cylinder Liners in V-8 Engine," SAE 880109, 1988.
9) C. Arcoumanis, "Coolant Flow in the Cylinder Head/Block of the Ford 2.5L DI Diesel Engine," SAE 910300, 1991.