

실린더 블록 사이의 냉각수 유입홀이 대형 디젤엔진의 냉각성능에 주는 영향

이상규* · 임동렬** · 이상업** · 김민정** · 유승현***

Effect of Coolant Flow Passages Between Cylinder Blocks on the Cooling Performance of a Heavy-duty Diesel Engine

Sang-Kyoo Lee*, Dong-Ryul Rhim**, Sang-Up Lee**, Min-Jung Kim**, Seung-Hyun Yoo***

Keywords : CFD(전산유체역학), Engine Coolant Passage(엔진냉각수유로), Gasket Hole(가스켓홀)

Abstract

In this analytical study on the engine coolant flow of a heavy-duty diesel engine with 4 valves and linear-type 8 liter 6 cylinders, the characteristics of pressure drop and engine cooling performance with the additional coolant passages between cylinder blocks have been investigated. Since the most part of pressure drop is caused by the coolant flow passages inside a cylinder head and cylinder blocks for this type of heavy-duty diesel engines, the advantage of pressure drop is just 2.6% and the characteristics of heat transfer and the distribution of coolant velocities in the head part show little differences in case of additional coolant passages. Thus the coolant flow passages between cylinder blocks make little contribution on the cooling performance of heavy-duty diesel engines

1. 서론

최근에 이르러 엔진의 고성능, 고출력 및 경량화 추세에 따라 엔진의 최적냉각이 차량개발단계에서 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 엔진 냉각은 엔진성능 및 내구성 등에 미치는 중요성과 함께 오래전부터 많은 연구와 개발이 진행되고 있는 분야로써 엔진 설계 시 냉각특성에 직간접적으로 영향을 미치는 많은 변수들에 대한 분석 및 검토가 충분히 이루어져야 한다. 냉각수 유로에 대한 연구는 1970년대 말부터 Ernest[1] 등에 의해 시작되었고 1990년대 초에 이르러서는 Takenaka[2], Hoag[3], Sandford[4] 등의 연구자에 의해서 전산유체역학(Computer Fluid Dynamics, CFD)과 실험을 병행하며 냉각수 유로 형상의 최적화에 대한 연구로 발전되었다. 1990년대 후반 이전까지는 냉각수의 유동만을 해석하였으나 최근에는 냉각수와 엔진 본체를 모두 포함하는 열/유동해석이 진행되고 있다. 복잡한 엔진블록과 헤드 내 냉각수 유로에서의 열유동을 정확하게 예측하고 설계하는 것은 사실상 불가능하므로 주로 경험치를 기준으로 설계하는 것이 일반적인데 냉각수 유로 설계가 잘못되는 경우 엔진에서 발생한 열은 냉각수 유로에 충분히 전달되지 못하게 되어 엔진내부의 온도는 비정상적으로 상승하게 된다. 이는 결과적으로 연소의 불안정, 녹킹, 열응력에 의한 실린더 보어변형 등의 현상과 함께 엔진성능 및 내구성에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 냉각수유로에서 열적으로 취약할 우려가 있는 국부적인 부분을 파악하는 것이 가장 중요하나 실험만으로는 이러한 부분을 파악하

는 것이 매우 어렵기 때문에 CFD를 많이 활용하고 있다.

본 연구에서는 대형디젤엔진의 냉각수 유로에서의 유동 특성을 상용 CFD코드를 이용하여 예측하였고 엔진헤드와 블록 및 오일쿨러 내부에서의 냉각수 유동과 관련된 주요 특성들에 대하여 분석하였다. 또한 냉각성능의 개선을 위하여 실린더 블록 간 유입홀의 유무가 전체 냉각수 유동과 냉각 성능에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

2. 수치해석 및 경계조건

본 해석에 사용된 대상엔진은 직렬 6기통 4밸브 디젤엔진으로써 배기량 8,000 cc. 최대 350마력의 대형엔진이다. 해석에 사용된 전체 냉각수 유로는 헤드, 실린더 블록, 오일쿨러와 서지탱크로 구성돼 있다. Fig. 1에서는 냉각수 유로의 3-D surface 모델을 보여주고 있으며 계산격자 생성에는 HyperMesh와 ICFM-CFD를 이용하였다. 해석격자의 수가 상당히 많아서 격자 생성의 효율성을 높이기 위해 전체 냉각수 유로를 헤드, 실린더 블록, 오일쿨러와 서지탱크가 있는 4가지 부분으로 나누어서 각 부분별로 격자를 생성하였으며, 복잡한 형상의 냉각수 유로를 보다 상세히 묘사하기 위해 전체적으로 사면체형태의 격자로 구성하고 해석의 신뢰도를 높이기 위해 벽면경계층에서는 오면체형태의 격자로 벽면을 형성하였다. 전체 해석격자는 실린더 헤드 부분에 약 450,000개, 실린더 블록에 약 400,000개, 오일쿨러와 서지탱크부에 약 80,000개, 그리고 가스켓 홀 부분에는 2,000개의 계산격자를 생성하였다.

*,** 고등기술연구원

* corresponding author, sanggyu@iae.re.kr

*** 아주대학교 기계공학과

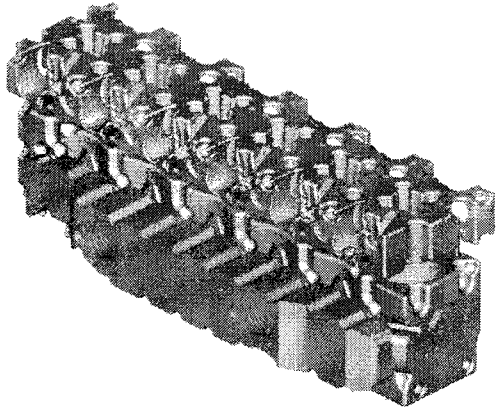


Fig. 1 3-D surface model of engine coolant passage

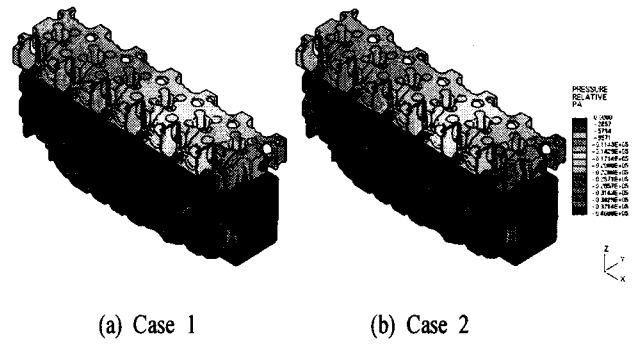
냉각수 유동해석에 사용된 소프트웨어는 범용 CFD 코드인 Star-CD를 사용하였다. 본 해석에서 사용한 모델은 다음과 같다. 난류모델로는 벽함수를 사용하는 표준코레이놀즈수 k-ε 난류모델을, 공간 차분법으로는 MARS (Monotone Advection and Reconstruction Scheme)을, 정상상태유동해석을 위해 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 사용하였다. 냉각수 유동은 비압축성 정상상태유동으로 가정하였고, 작동유체인 물의 밀도 및 점성계수는 실제 냉각수 온도를 고려하여 각각 975 kg/m^3 , 0.000355 Ns/m^2 로 설정하였다. 입구에서는 유량조건인 270 l/min 을 주었고 난류강도 및 혼합거리는 각각 유속의 5%와 입구수력직경의 10%로 설정하였다.

3. 해석결과 및 검토

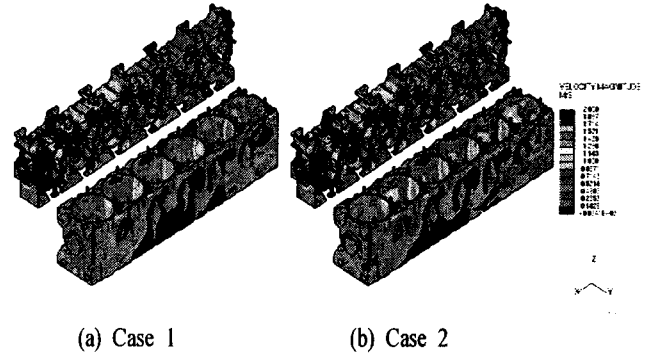
본 해석에서는 블록 간 유입홀의 유무가 전체 냉각수 유동에 미치는 영향을 알아보려고 한다. 설명의 편의상 블록 간 유입홀이 있는 경우를 Case 1이라 칭하고, 블록 간 유입홀이 없는 경우를 Case 2라 칭하기로 한다.

Fig. 2은 두 Case의 압력 분포를 나타낸 그림이다. Case 1의 압력강하량은 0.374bar 이고 Case 2의 압력강하량은 0.384bar 이다. 유입홀이 있는 Case 1의 전체적인 유로면적이 크기 때문에 Case 1의 압력강하량이 작긴 하지만 그 값은 2.6%정도 줄어든 것으로 그 효과가 미미하다. 이는 Fig. 2를 보면 알 수 있듯이 압력강하가 가장 크게 일어나는 곳은 블록에서 헤드로 유입되는 곳이다. 오일쿨러와 블록의 압력은 거의 동일한 수준이지만 블록과 헤드의 압력차이는 크게 나타난다. 즉, 블록과 헤드 사이에 있는 가스켓 크기에 비하여 오일쿨러에서 블록으로 유입되는 홀이 상당히 크기 때문에 블록 간 유입홀이 생기더라도 압력강하에는 큰 효과를 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3는 두 Case의 전체적인 속도 분포를 나타낸 그림이다. 두 Case의 전체적인 속도 분포는 유사한 경향을 보이고 있다. 헤드의 속도 분포를 보면, 각 블록에서 올라간 냉각수들이 출구로 나가기 때문에 출구에서 가까운 헤드일수록 큰 속도를 갖게 된다. 또한 각 헤드의 가스켓 중 직경이 가장 큰 가스켓에서의 유속이 큰 것을 확인 할 수 있다. 블록에서는 헤드에 비하여 낮은 유속이 분포되는데 Case 2의 경우가 Case 1보다 유속이 다소 높음을 알 수 있다.



(a) Case 1 (b) Case 2
Fig. 2 Comparison of pressure contour



(a) Case 1 (b) Case 2
Fig. 3 Comparison of velocity magnitude

Fig. 4은 블록 상단면으로 부터 122mm 아래에서의 속도분포를 나타낸다. 입구에서 유입된 냉각수는 바로 오일쿨러를 만나게 되어 큰 저항을 받아서 대부분의 유동은 오일쿨러의 양 쪽으로 흐르게 되는 것은 두 Case 모두 유사하다. 다만 Case 2는 블록 간 유입홀이 없기 때문에 그만큼의 유로 면적이 줄어들어 블록으로 유입되는 냉각수 속도가 커지게 된다. 3, 4번 블록에서 Case 2가 속도가 더 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 5은 블록 상단면으로 부터 70mm 아래에서의 속도분포를 나타낸다. Fig. 4의 경우와 마찬가지로 Case 2가 블록으로 유입되는 속도가 큰 것을 확연히 알 수 있다. 따라서 Case 2가 Case 1보다 블록에서의 냉각성능이 더 좋을 것으로 판단된다.

Fig. 6은 Fig. 5에서의 입구부분의 속도 벡터를 나타낸다. 냉각수 입구가 구부러져 있기 때문에 유입된 냉각수의 주된 유동은 블록과 반대로 향하게 된다. 따라서 Case 2는 1번 블록으로 유입되는 냉각수의 유속과 유량이 줄어든다. 그러나 Case 1은 1, 2번 블록 간 유입홀 사이로 냉각수의 유입이 발생하기 때문에 1번 블록의 냉각성능은 Case 1이 좋을 것으로 판단된다.

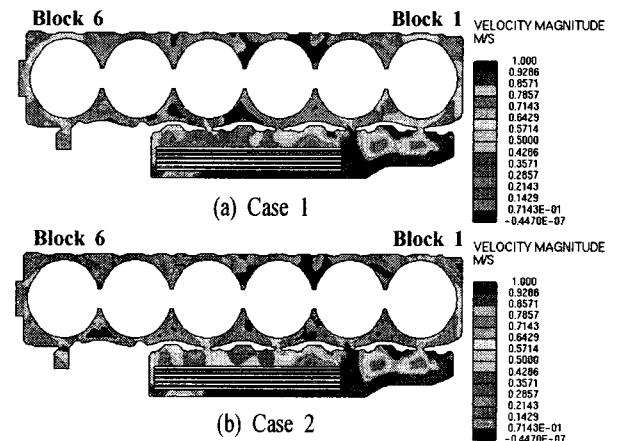


Fig. 4 Comparison of velocity magnitude at -122mm

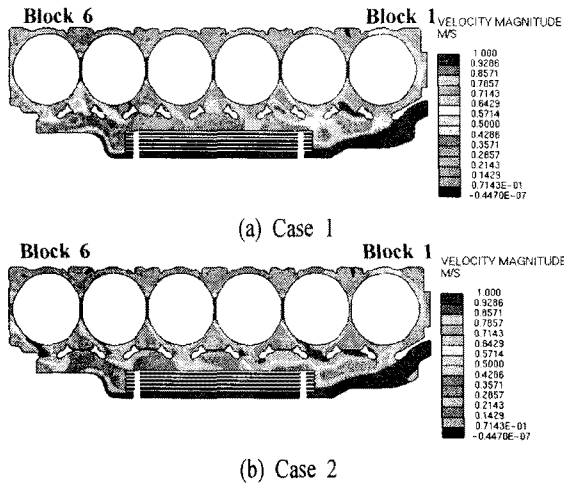


Fig. 5 Comparison of velocity magnitude at -70mm

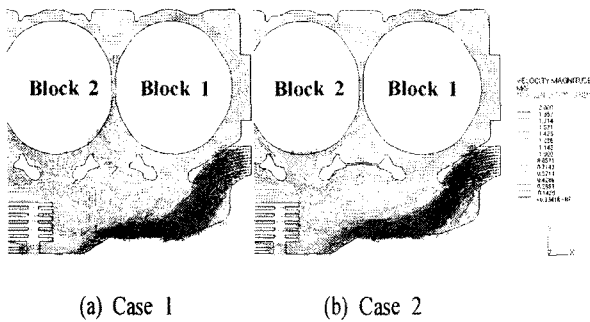


Fig. 6 Comparison of velocity vector at -70mm

Fig. 7는 실린더 상단면으로 부터 15mm 아래에서의 속도 분포를 나타낸다. 앞서 설명한 유로 면적의 감소로 Case 2가 전반적으로 높은 속도분포를 보이고 있다. 연소가 일어나는 엔진의 보어 주위는 높은 온도를 갖게 된다. 엔진 보어와 보어 사이의 얇은 유로는 특히 높은 온도를 지니게 될 것이다. 이러한 얇은 유로에서는 냉각수의 유속이 커지므로 높은 냉각 성능을 지니게 될 것이다.

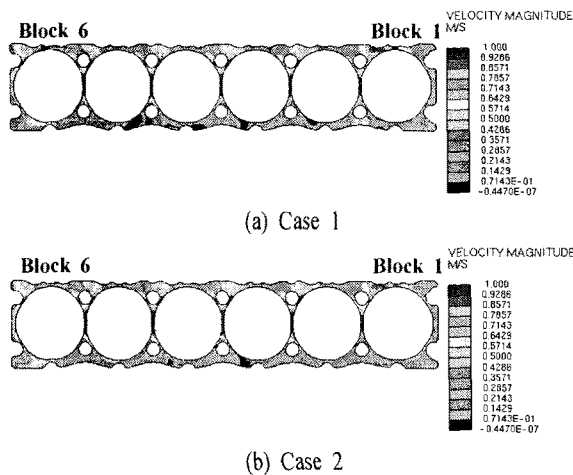


Fig. 7 Comparison of velocity magnitude at -15mm

Fig. 8은 헤드 하단면으로 부터 8mm 위에서의 속도 분포를 나타낸다. 6번 헤드에서 1번 헤드로 갈수록 유속이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 블록에서 가스켓을 통과하여 각각의 헤드로 유입된 냉각수는 출구 쪽으로 나가기 때문에 출구 쪽에 가까운 헤드 일수록 많은 유량이 흘러 속도가 커지기 때문이다. 블록에

서의 속도 분포와는 다르게 헤드에서의 속도분포는 Case 1, 2 모두 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 블록 간 유입홀은 블록으로 유입되는 냉각수의 속도의 분포에 영향을 미칠 뿐, 각 블록 별로 유입되는 냉각수의 유량은 큰 차이가 없기 때문이다. Fig. 9도 역시 Case 1, 2 모두 유사한 속도분포를 나타낸다.

Fig. 8 (a)에서 배기밸브 브릿지의 유동을 보기위해 Section A와 B를 설정하였다. 배기밸브 브릿지는 고온의 배기가스로 인하여 충분히 냉각이 필요한 구간이다. Case 1과 2의 헤드에서의 속도 분포는 유사하기 때문에 Case 1의 속도 분포만을 확인하여도 충분하다. Fig. 10는 Case 1의 Section A와 B의 속도 분포를 나타낸다. 6번 헤드의 배기밸브 브릿지에 해당하는 Section A에서의 유속이 다소 작은 모습을 보인다.

Fig. 11은 Case 1, 2의 블록 유입부에서의 유량비율 (%)과 평균속도 (m/s)를 비교한 것이다. 검은색은 Case 1의 결과를, 파란색은 Case 2의 결과이다. 블록 유입부의 평균속도의 분포는 유량 분포와 정비례 하는 경향을 나타낸다. Fig. 6에 본 현상 때문에 1번 블록으로 유입되는 유량이 가장 작고 2번 블록으로 유입되는 유량이 가장 큰 것을 알 수 있다. 3번 블록에서 6번 블록으로 갈수록 유량과 유속이 커지는 것으로 알 수 있다.

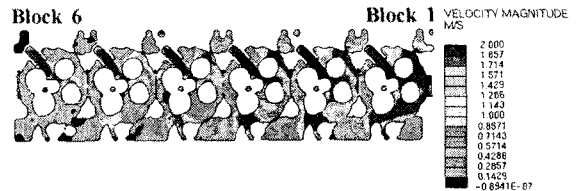
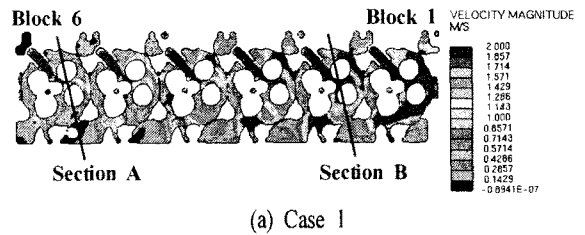


Fig. 8 Comparison of velocity magnitude at 8mm

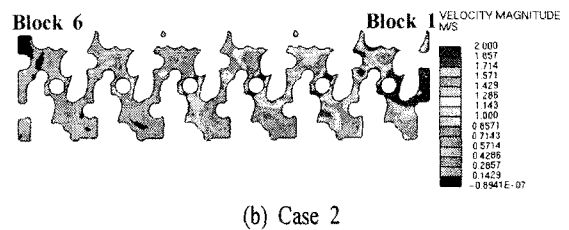
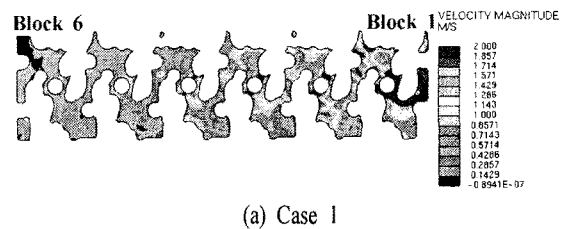


Fig. 9 Comparison of velocity magnitude at 28mm

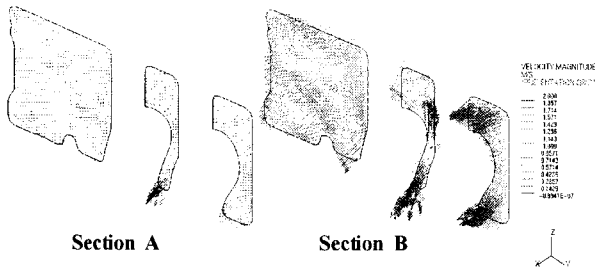
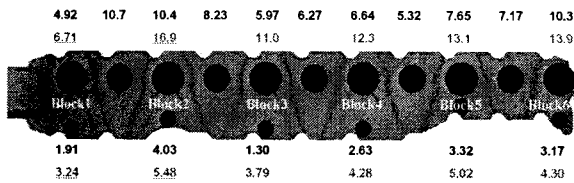
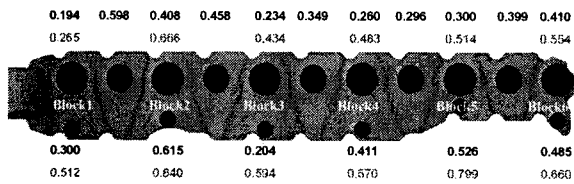


Fig. 10 Velocity vector at section A and B (Case 1)



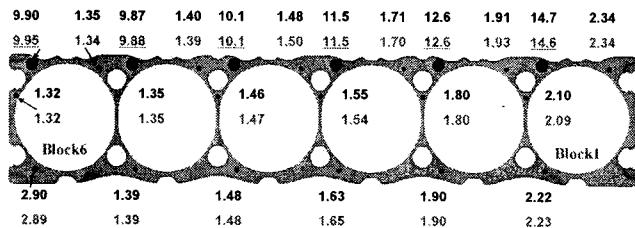
(a) Flow rate



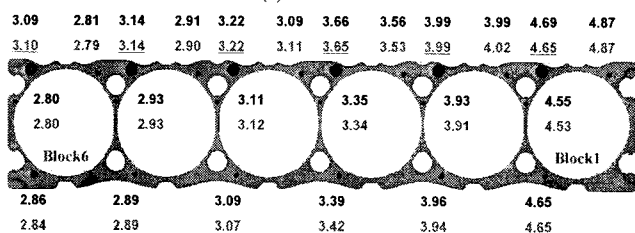
(b) Mean velocity

Fig. 11 Comparison between Case 1 and Case 2 at block including hole

Fig. 12는 Case 1과 2의 헤드 가스켓 홀에서의 유량비율 (%)과 평균속도 (m/s)를 비교한 것이다. 검은색은 Case 1의 결과물, 파란색은 Case 2의 결과이다. 가스켓홀의 평균속도의 분포는 유량분포와 정비례 하는 경향을 나타낸다. 출구 쪽 헤드로 갈수록 유량과 유속이 커지게 된다. 이는 출구로 갈수록 헤드의 압력이 낮아지기 때문에 블록에서 헤드로 많은 유량이 유입되기 때문이다. 헤드 가스켓 홀에서는 Case 1과 2의 결과가 거의 유사함을 알 수 있다. 이는 헤드쪽 단면인 Fig. 8과 9에서의 속도분포 결과에서 설명한 바와 같다.



(a) Flow rate



(b) Mean velocity

Fig. 12 Comparison between Case 1 and Case 2 at head gasket hole

Fig. 13는 헤드의 평균열전달계수를 나타낸다. 출구 쪽으로 갈수록 평균열전달계수가 커지게 된다. 이는 Fig. 12에 보듯이 출구 쪽으로 갈수록 평균유량과 유속이 커지기 때문이다. 그리고 Case 1과 2사이에는 거의 동일한 분포를 보이는 것을 알 수 있다.

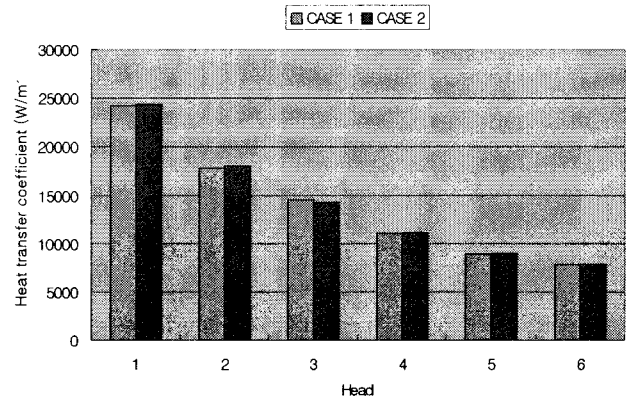


Fig. 13 Comparison of mean heat transfer coefficient

4. 결론

블록 간 유입 홀이 미치는 영향을 정리하면 다음과 같다. 블록 간 유입홀로 인하여 생기는 유표면적의 증가로 압력 강하량은 2.6% 정도로 미미하다. 이는 대부분의 압력강하는 블록과 헤드사이에서 발생하기 때문이다. 헤드로 유입되는 유량은 블록 간 유입홀의 영향이 거의 미치지 않아 헤드부위의 유속분포나 열전달 특성은 거의 동일한 경향을 보인다. 블록 간 유입홀은 1번 블록의 냉각성능을 향상 시키지만 1번 블록을 제외한 모든 블록에서는 냉각 성능이 감소되고 블록간의 편차도 커진다. 이와 같은 결과를 종합하여 볼 때 냉각성능의 개선을 위해서는 블록 간 유입홀이 없는 경우가 더 유리하다고 판단된다.

헤드 가스켓홀의 통과유속은 2.8~4.9m/s 정도로 적절한 수준을 보여주지만 5번과 6번의 헤드부위는 다소 냉각성능이 떨어지고 배기밸브 브릿지에서의 냉각수의 유속이 다소 떨어지는 경향을 보여준다.

참고문헌

- [1] Robert P. Ernest, "A Unique Cooling Approach Makes Aluminum Alloy Cylinder Heads Cost Effective", SAE 770832
- [2] Yoshihide Takenaka, Yuzo Aoyagi, "Numerical Simulation and Experimental Observation of Coolant Flow Around Cylinder Liner in V-8 Engine", SAE 880109
- [3] Kevin L. Hoag, Susan Brasmer, "The Use of Flow Visualization and computational Fluid Mechanics in Cylinder Head Cooling Jacket Development", SAE 891897
- [4] Malcolm H. Sandford, Ian Postlethwaite, "Engine Coolant Flow Simulation - A Correlation Study", SAE 930068
- [5] Kyung-Uk Baek, Byung-Hun Lee, Sang-Ho Lee, Nam-Hyo Cho, "CFD Simulation of Coolant Flow in a Large Diesel Engine", KSAE 99380172