

디젤엔진 냉각수 유동특성 개선을 위한 수치해석적 접근방법

이성원*, 박성영**

*공주대학교 기계자동차공학부

**공주대학교 공과대학 생산기술연구소

e-mail:sungyoung@kongju.ac.kr

Computational Approach to Improve Diesel Engine Coolant Flow Characteristics

Sung-Won Lee* and Sung-Young Park**

*Div. of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

**Industrial Technology Research Institute, College of Engineering, Kongju National University

요 약

2600cc급 디젤엔진의 냉각수 유동특성 개선을 위한 수치해석적 방법을 제시하기 위하여 본 연구가 수행되었다. 실린더 블록 및 헤드의 유동특성 분석을 위하여 개스킷 냉각수 통로의 면적과 갯수가 중점적으로 고려되었다. 베이스 모델의 수치해석적 분석에서 입구측에 치우친 냉각수 홀의 배치에 의하여 1, 2번 실린더 헤드로만 주 유동이 발생되었다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 개스킷 냉각수 통로를 재설계하였다. 수정모델은 주 유동이 4번 실린더 측으로 유도되었으며, 배기밸브 사이의 유동도 개선되었다. 재설계과정에서 개스킷 냉각수통로의 전체면적을 고려치 않게 되면 유량이 줄어들게 되는 문제점이 발견되었다. 본 연구를 통하여 실린더 헤드와 블록사이의 냉각수 유동을 제어하는 개스킷의 중요성을 확인하였으며, 냉각수 유동특성 최적화는 개스킷 홀의 총 면적을 고려하여 냉각수의 총 질량유량을 설계하여야 한다.

1. 서론

냉각수는 엔진의 성능 및 부품의 신뢰성 확보를 위한 중요한 인자로, 엔진의 출력과 운전조건을 고려한 최적의 냉각수 유로 설계는 엔진 성능 증대와 배기가스 저감을 위해 필수적인 엔진 개발의 단계이다 [1]. 고성능, 고출력 및 경량화 엔진을 설계하는 최근 추세에 따라 엔진의 최적냉각온도의 제어는 점점 어려워지고 있다. 그리고 최근 들어 연비규제와 배기가스 규제가 강화됨에 따라, 연비저감 및 배기가스 저감에 관련된 냉각수 공급기술의 중요성이 증대되고 있다. 이러한 냉각수 기술의 필요성에 따라 가변냉각, 전자제어 서모스탯 및 분리냉각 등의 신 냉각기술의 개발이 활발히 진행되고 있다[2-5]. 또한 엔진의 출력증대를 위한 배기가스온도 저감사양의 냉각수 코어의 개발도 실차에 적용되고 있다.

냉각수 유로의 설계 개발은 시작엔진 제작 및 엔진시험을 수차례 반복하는 장기간 작업을 통하여 최종적으로 완료하게 된다. 이러한 장기간에 걸친 개발을 단축시키기 위하여 CFD 기술을 적용한 냉각수

유로 설계를 검토하고 최적화하는 일이 필수적인 개발 단계가 되어가고 있다[6].

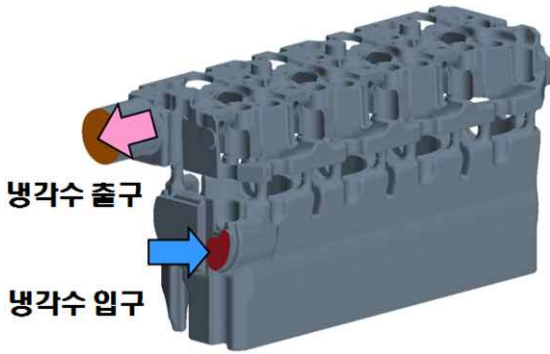
본 연구에서는 냉각수 유로 형상을 변경하지 않고 개스킷 홀의 크기, 개수 및 위치선정 만을 최적화하여 통과유량을 변경하고 이를 통해 유동특성을 개선하였다. 수정 모델은 주 유동의 분배와 배기밸브 사이의 유동이 개선되었으나, 작아진 개스킷 홀의 총 면적에 의하여 개스킷 홀을 통한 유량이 감소하였다. 본 논문에서는 이러한 유량감소 결과를 분석하고 추후 설계 변경을 위한 해결방안을 제시하고자 한다.

2. 냉각수 코어 모델 및 해석 방법

2.1. 해석 모델

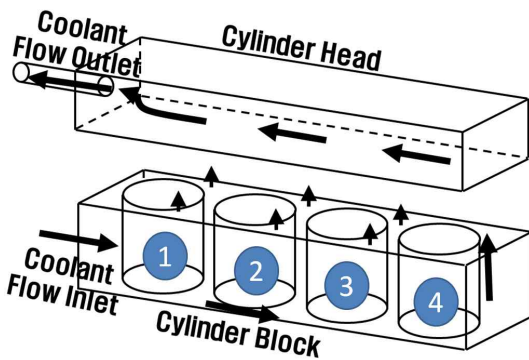
본 연구에서 사용한 엔진 모델은 2600cc급 직렬 4기통 디젤엔진이다. 그림 1은 엔진의 냉각수 코어 모델을 보여주고 있다. 해석 모델의 구조는 상부의 실린더 헤드의 냉각수 코어와 하부의 실린더 블록 코어부로 나뉘고, 그 사이에는 실린더 헤드부와 실

린더 블록을 나누어 주는 개스킷 부가 있다. 실린더 블록부에 냉각수유로의 입구가 있고, 헤드부에 출구가 있다. 본 모델에서는 냉각수 펌프를 제외한 코어 부분만을 해석의 대상으로 고려하였다. 실린더 헤드부에는 흡배기 밸브 주위 냉각수 유동을 위한 코어를 구성하고 있다.



[그림 1] 베이스모델 냉각수 코어 모델

본 연구에서 사용된 엔진의 냉각수 유동패턴은 Series Flow로써 1번 실린더 블록에 냉각수 입구가 위치해있고(그림 2), 개스킷 홀을 통하여 실린더 블록과 실린더 헤드로의 유동이 이루어진다. 이러한 유동패턴은 냉각수 총 유량이 적은 장점이 있지만, 개스킷 홀의 영향에 의해 균일하지 못한 냉각수 유동이 발생할 수 있는 단점이 있다.



[그림 2] 냉각수 유동 개략도

2.2. 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서 유동해석은 상용유동해석 소프트웨어 (STAR-CCM+)를 사용하였으며, 약 760,000 여개의 poly-hederal 격자를 구성하였다. 코어의 벽면에 벽법칙을 적용하기 위하여 벽면에 2개의 격자를 추가로 삽입하여 해석을 수행하였다. 난류 모델은 Standard

$k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 냉각수 펌프를 포함하지 않고 100L/min의 평균 냉각수 체적 유량을 입구 경계 조건으로 부여하였다. 출구 경계조건은 $\partial P/\partial n=0$ 을 적용하였다. 냉각수는 비압축성의 순수한 물로 고려하였으며, 이에 대한 물성치를 사용하였다. 본 연구에서는 순수 유동에 의한 효과만을 고려하여 유동해석을 수행하였으며, 연소실 벽면의 온도관련 데이터의 부재로 열전달은 고려하지 않았다.

냉각수 유동은 정상상태의 난류 유동을 가정하였으며 본 해석에서 사용된 상용소프트 웨어의 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식 및 난류운동에너지 방정식과 난류운동에너지 소산방정식은 식 (1) ~ (4)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i}((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}) + S_k \quad (3)$$

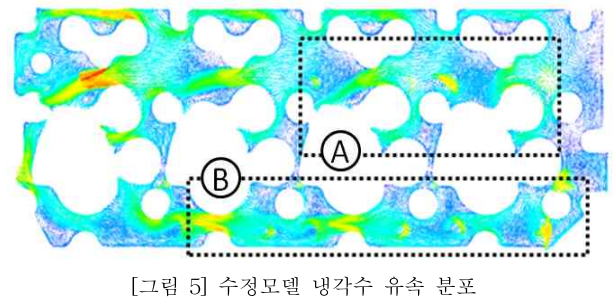
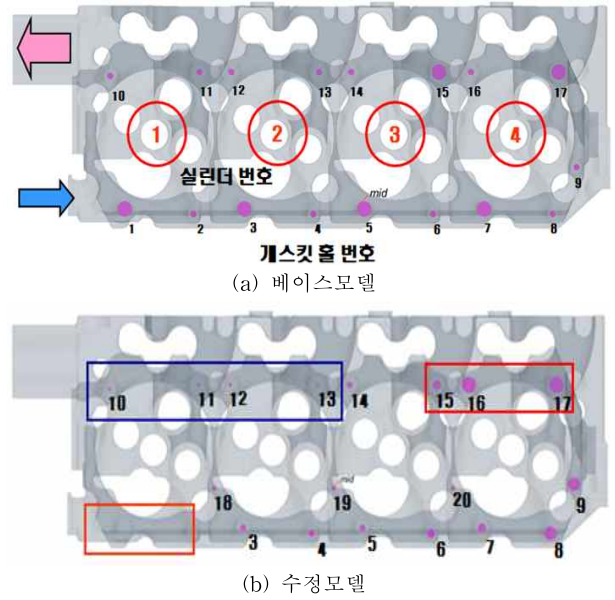
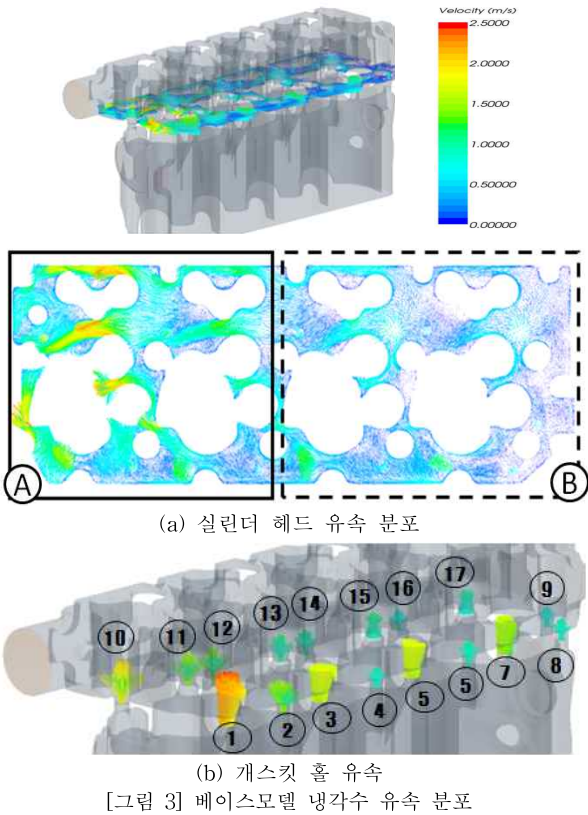
$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i}((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}) + S_\epsilon \quad (4)$$

3. 해석 결과 및 고찰

3.1. 베이스모델 냉각수 유동특성

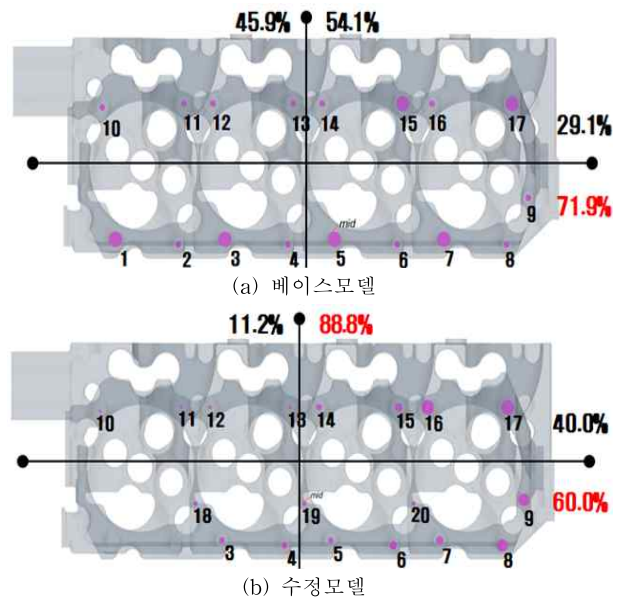
엔진의 냉각수는 엔진의 변형 및 내구성에 관련되는 중요한 인자이다. 특히 열이 집중되는 배기포트 주위와 연소실 상면의 냉각수 유동이 중요하다. 배기밸브사이의 좁은 유로 부분의 냉각수 유량 및 속도 성분은 중요하게 고려되어야 한다.

베이스모델의 유동특성을 파악하기 위하여 유동해석을 수행한 결과, 베이스 모델의 가장 큰 문제점은 입구측에 치우친 개스킷 홀에 의하여 1, 2번 실린더 및 헤드로만 발생하는 주 유동(A)이다. 이는 3, 4번 실린더가 과열(B)되어 보어 변형이나 오일 소모량이 증가할 가능성이 있을 것으로 예상된다(그림 3(a)). 개스킷 홀을 통하여 실린더 헤드로 유입되는 유동의 속도를 분석한 결과(그림 3(b)), 냉각수 입구와 가장 가깝고 면적이 큰 ①번 개스킷 홀이 매우 빠른 속도로 냉각수가 실린더 헤드로 유입됨을 확인 할 수 있었다. 이는 1, 2번 실린더 측으로 집중되는 주 유동에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.



3.2. 수정모델 냉각수 유동특성

베이스 모델의 문제점을 해결하기 위해 새로운 개스킷 홀의 분배를 재설정하였다(그림 4). 수정모델은 냉각수의 균등한 분배를 위하여 1, 2번 실린더측에 치우친 개스킷 홀의 구성을 변경하여 3, 4번 실린더측으로 주 유동을 유도하였다. 또한 배기온도 저감을 위해서 배기 포트 코어 하면에 새로운 냉각수 유로(18~20)를 구성하여 배기온도 저감을 시도하였다. 수정모델(그림 5)의 유동해석 결과, 3, 4번 실린더 배기측 유동이 강화(A)되었고 2, 3, 4 실린더의 분배 유동이 증가(B)하였다. 그림 6은 베이스모델과 수정모델의 개스킷 홀을 통하여 실린더 헤드로 유입되는 냉각수 유량분포 해석 결과를 보여주고 있다. 주 유동이 3, 4번 실린더측으로 유도되어 냉각수 분배가 개선되었으며, 이는 베이스모델의 문제점이었던 3, 4번 실린더의 과열을 방지할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 배기밸브 사이의 유동해석결과, 1, 2번 실린더측으로 치우친 유량과 속도가 평균화되었으며, 총 유량이 증가되었다. 이는 배기온도 저감에 긍정적인 효과를 줄 것이라 사료된다.



3.3. 개스킷 홀의 면적을 고려한 경계조건 재설정

본 연구에서는 냉각수 코어의 유로형상을 변경하지 않고 개스킷 홀만의 최적화를 통하여 통과유량을 변경하고 이를 통해 냉각효과를 최적화하고자 하였

다. 하지만 개스킷 홀의 총 면적을 고려치 않고 설계한 냉각수 코어의 유동해석 결과를 분석하던 중, 표 1과 같이 베이스모델대비 수정모델에서 입구와 출구의 압력차(ΔP)가 증가됨을 확인하였다. 이는 개스킷 홀의 총 면적 감소가 유동저항으로 작용한 것으로 판단된다. 동일한 용량의 냉각수 펌프를 적용하게 되면, 냉각수 총 유량이 감소하여 냉각효율에 부정적 영향을 미치게 될 것이다.

베이스 모델의 총 압력강하량을 입구 경계조건으로 재설정하여 추가 해석을 수행한 결과, 표 2와 같이 수정모델에서 유량이 24% 감소함을 확인하였다. 따라서 개스킷 홀을 통한 냉각수의 유량은 총 면적과 ΔP 에 큰 영향을 받으며, 반드시 고려해야 할 설계인자이다.

[표 1] 개스킷 홀의 총 면적과 압력차

	베이스모델	수정모델
입구 경계조건 (L/min)	100	100
전체면적 (mm ²)	894.1	642.9 (-28%)
ΔP (Pa)	7246	11,400 (+36%)

[표 2] 경계조건 재설정 후 유량

	베이스모델	수정모델
입구 경계조건 (Pa)	7,246	7,246
Q (kg/s)	1.62	1.23 (-24%)

4. 결 론

본 연구를 통하여 냉각수 유로 형상을 변경하지 않고 개스킷 홀의 크기, 개수 및 위치선정을 개선하여 냉각수 유동특성을 개선하고자 하였으며, 다음과 같은 결론 및 효과를 얻을 수 있었다.

수정 모델은 주 유동이 3, 4번 실린더로 유도되어 냉각수 분배가 개선되었으며, 배기밸브 사이의 유량이 증가하였다. 하지만 감소한 수정모델의 개스킷 홀 총 면적은 유동저항으로 작용하여 냉각수 유량을

감소시켰다. 개스킷 홀을 통한 냉각수 유동의 최적화는 개스킷 홀의 총 면적 및 유동저항을 고려하여 설계하여야 하며, 경계조건을 입출구의 압력차와 총 유량을 고려하여 설정하여야 한다.

수정모델에서 개스킷 홀의 면적을 비율적으로 증가시킨 모델은 동등 이상의 개선효과가 있을 것으로 예상되며, 추후 이에 대한 추가해석과 개스킷 홀의 면적과 압력차에 의한 유량의 상관관계에 관한 연구를 진행할 예정이다.

참고문헌

- [1] 김성수, “가솔린 기관의 시동조건에 따른 HC의 배출특성,” Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 3, 2004
- [2] 위신환, 민영대, 이종태, “냉각수 공급방식 및 국부적인 물통로의 형상 변화에 따른 냉각수 유동 특성 및 연소실 벽면의 냉각효과,” Transactions of KSAE, Vol. 11, No. 1, 2003.
- [3] 이동균, 이교승, 이진호, “Numerical Analysis of 3-D Flow Field in the Engine Block Coolant Passage”, SAE-99370048, 2003.
- [4] 백경옥, 이상호, 조남효, “CFD 기법을 이용한 실린더헤드 가스켓홀 통과 유량의 최적화,” 한국자동차공학회논문집, 제8권, 제5호, pp. 121-128, 2000.
- [5] 오창석, 이재현, 유택용, 신승용, 김우태, “분리냉각시스템을 도입한 신엔진의 연비향상 및 배기저감에 관한 실험적 연구,” 한국자동차공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 118-123, 2002.
- [6] 이상인, 박성영, “수치해석적 접근을 통한 불꽃점화 엔진의 냉각수 유동특성 개선,” 한국산학기술학회논문지, 제10권, 제12호, pp.3553-3558, 2009.