

엔진 냉각 시스템 개선에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Engine Cooling System Improvement

전 문 수*, 황 용 하*
M. S. Chon, Y. H. Hwang

ABSTRACT

This paper describes the improvement of engine cooling system. To improve engine cooling performance, the authors approached in two ways. One is to increase water pump performance, changing of impeller shape and lightening of material were carried out. The second one is cooling efficiency rise, which were investigated with head gasket coolant flow passage optimization with flow visualization technique. The test results show that water pump performance was increased effectively, reduction of pump drive torque, and increase of pump flow-rate and pressure rise. Gasket hole pattern optimization test results represent an optimized head coolant flow which stands cross flow from exhaust to intake port side and small vortex were removed.

주요기술용어(Key Words): Engine Cooling System(엔진 냉각계), Water Pump(워터펌프), Flow Visualization(유동 가시화), Head Gasket(헤드 가스켓), Pump Efficiency(펌프 효율)

1. 서 론

엔진 냉각 시스템을 최적화하는 것은 엔진의 성능 및 연비 향상, 그리고 배기 가스 저감 측면에서 매우 중요한 인자이다. 특히 최근에는 엔진의 고출력화를 추구하면서 엔진 냉각 시스템의 최적 설계의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 엔진 냉각 시스템을 최적화하기 위해서는 워터 펌프의 효율을 개선하는 것 이외에도 엔진 내부의 냉각 유로 최적화 및 엔진의 주요 부위별 온도를 측정하고 열 부하 및 열 방열을 등을 엄밀하게 평가하고, 과열 원인 규명 및 제거를 통하여 냉각 시스템 특성을 최적화해야 한다.

I. C. Finlay, B. I. Parks 등은 실린더 헤드

온도에 대한 실린더 헤드 재질, 냉각수 성분, 냉각수 압력, 냉각수 온도, 그리고 냉각수 유속 등의 영향에 대해서 연구를 했다⁽¹⁾.

Kckim 등은 자동차용 워터 펌프의 성능에 심각한 저해를 유발하는 워터 펌프 캐비테이션 해석을 위해 펌프 송출 유량을 이용한 방법을 제시했다⁽²⁾.

냉각수 혼합 성분이 엔진 열방출에 미치는 영향에 대해서 P. J. Shayler 등은 100%의 물을 사용한 경우와 비교해서 물 50% : EG 50% 를 혼합한 경우에 대해 연구를 하였으며 연구 결과 대체로 5% 정도 낮은 열방출량을 가진다는 것을 밝혀냈다⁽⁴⁾.

Lee 등은 엔진 냉각수 회로내의 유동을 수치적으로 해석하였으며, 그 결과를 이용하여 냉각 시스템 최적화를 시도하였다.

이와 같이 엔진의 효율적인 냉각과 관련된

* 충주대학교 에너지시스템공학과

많은 변수들 중 본 연구에서는 워터 펌프의 임펠러 변경과 재질 변경에 따른 경량화에 의한 효율 향상 방법과 헤드 가스켓의 냉각수 유로 홀 패턴의 변경을 유동 가시화 기법을 이용하여 헤드 내 냉각수 유동 패턴의 개선으로 실린더 헤드내의 냉각수의 균일한 유동과 유속을 확보함으로써 엔진의 냉각 성능 향상을 목적으로 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험 장치와 데이터 획득 장치를 나타낸 개략도이다.

엔진의 연소 과정에 의한 열방출 과정을 모사하고, 냉각수 온도를 설정 온도로 유지시키기 위하여 엔진 블록 내부의 피스톤을 제거한 뒤, 전기 히터를 설치하여 엔진 블록을 가열하여 냉각수의 온도를 설정하였다.

워터 펌프의 구동은 7.5kW의 3상 교류 모터를 이용하여 구동하였으며, 회전 속도는 인버터를 이용하여 제어하였다. 또한 워터 펌프와

전기 모터 사이에 위상차 방식의 토크미터를 설치하여 펌프의 구동 동력을 측정하였다.

한편, 압력 센서 및 유량계를 설치하여 냉각회로 내의 냉각수 압력과 유량 분포를 측정하였다. 이 때, 유량계 설치로 인한 냉각수의 추가 유로 저항을 방지하기 위해 패러데이의 법칙을 이용한 자기 유도 전자 유량계 (inductive type flow-meter)를 사용하였으며, 냉각수는 현재 자동차용 부동액으로 널리 쓰이는 에틸렌글리콜(Ethylene Glycol, $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$, 이하 EG로 표기)을 물(H_2O)과 1:1의 체적비로 혼합하여 사용하였다.

또한 실린더 헤드 내 냉각수 유동 가시화를 위해서 헤드를 절단한 후 투명 아크릴판을 설치하였으며 가시화를 위한 입자로는 평균 입경 $100\mu\text{m}$ 인 Polyvinyl Chloride를 사용하였다. 광원으로는 최대 출력이 1kW 할로겐 램프를 사용하였으며, 가시화 실험의 경우 워터 펌프 회전 수를 2,000rpm으로 고정하여 실험을 수행하였다.

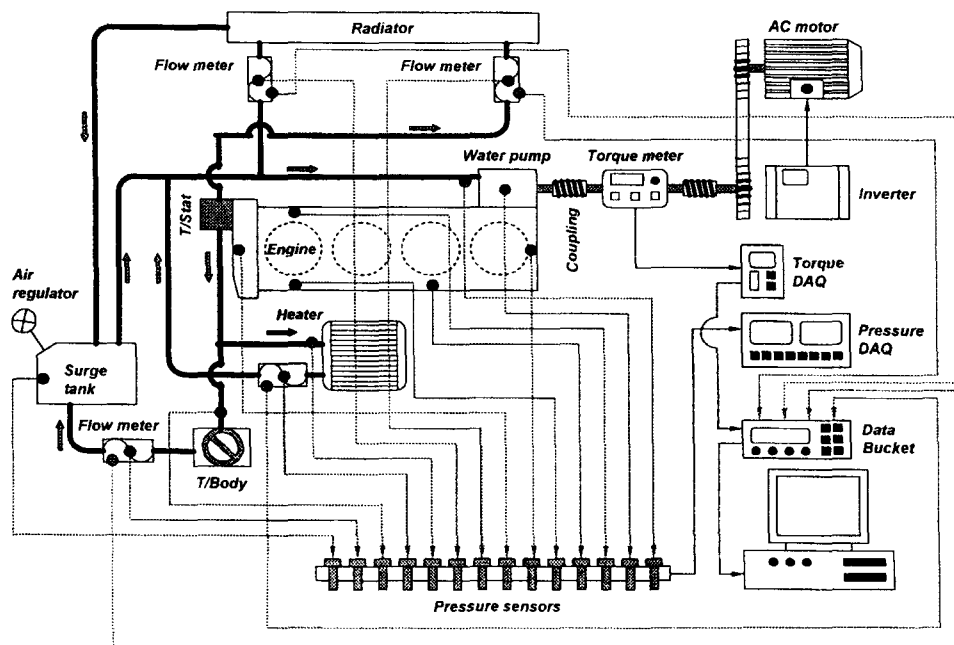


Fig. 1 Schematic diagram of experimental test rig

Fig. 2는 워터 펌프의 임펠러 형상 변화 및 재질 경량화에 따른 펌프 효율 변화를 알아보기 위해 사용된 3가지 워터 펌프의 기하학적 형상을 나타낸 것이다. 먼저 워터 펌프의 Back plate 유무에 따른 워터 펌프의 송출 유량 및 구동 토크를 비교하였으며, 재질을 경량화에 따른 효율 변화 실험도 병행하였다. 본 실험에 사용된 워터 펌프의 재원을 Table 1에 비교하여 나타내었다.

한편, Fig.3과 Fig.4에는 각각 본 실험에 사용된 엔진의 실린더 헤드, 엔진 블록 및 헤드 가스켓을 통과하는 냉각수 통로 및 실린더 헤드 냉각수 유로를 나타내었으며, Fig. 5에는 실린더 헤드 내 냉각수 유동의 최적화를 위해 사용된 4가지 종류의 가스켓을 나타내었다.

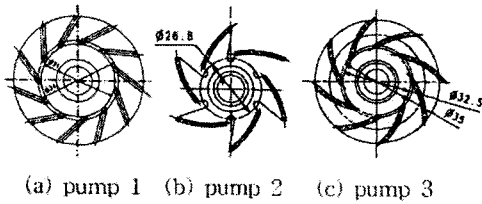


Fig. 2 Water pump geometry

Table 1. Specifications of tested water pumps

	Material	No. of plate	Back plate
Pump 1	FCD45	11	Exist
Pump 2	SPC2	6	Non-exist
Pump 3	Phenol	8	Exist

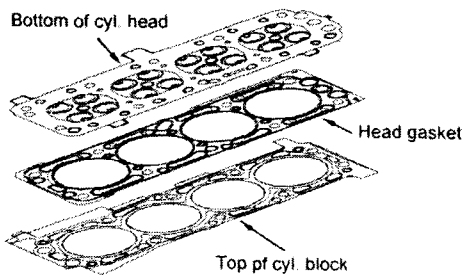


Fig. 3 Coolant passage of the test engine

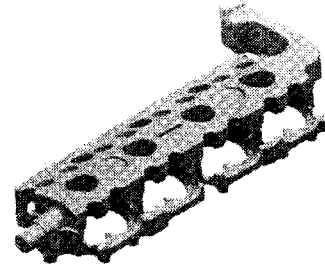
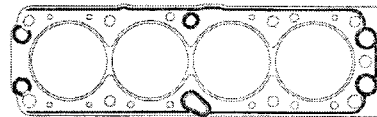
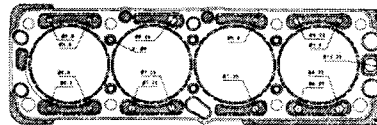


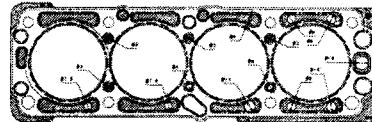
Fig. 4 Cylinder head water jacket



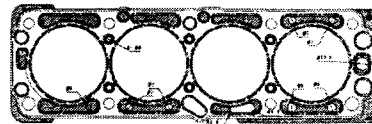
(a) gasket 1



(b) gasket 2



(c) gasket 3



(d) gasket 4

Fig. 5 Cylinder head gasket variants

3. 실험결과 및 해석

3. 1 워터 펌프 효율 개선

Fig. 6과 7은 각각 Fig. 2와 Table 1에 나타난 3가지 펌프를 엔진에 장착한 경우, 각각의 송출 유량 및 펌프 전후의 압력 차이를 도시한 것이다.

Pump 3을 적용한 경우 6,000rpm에서 펌프의 송출 유량 및 펌프 전후단의 압력 차이는 Pump 1 대비 각각 17.5%, 19.8% 가량 증가한 결과를 나타내었으나, Pump 2의 경우에는 송

출 유량 2.1% 증가, 압력 차이는 8.8% 감소한 것으로 나타났다. 이러한 결과가 나타난 이유는 Pump 2의 경우, 임펠러 입출구 각도 변경에 대한 펌프 송출 유량 증가 효과가 임펠러 Back plate 부재에 기인한 임펠러 입출구 압력 강하를 유발하여 송출 유량의 증가가 크게 나타나지 않았으며, Pump 3의 경우에는 임펠러 각도 변경 및 임펠러 수 감소에서 오는 슬립 현상의 저하로 인하여 유량 증가 크게 나타난 것으로 판단된다.

한편 실험에 사용된 펌프의 구동 토크 측정 결과를 측정하여 Fig. 8에 나타내었다. Pump 2와 3을 적용한 경우 6,000rpm의 회전 속도에서 Pump 1 대비 약 16.2%의 구동 토크가 감소한 결과를 나타내었다. Pump 2의 경우 임펠러 백

플레이트 제거 및 임펠러 개수 감소에 기인한 결과이며, Pump 3의 경우 워터 펌프의 재질이 주철 재질에서 합성 플라스틱 재질로의 변경에 기인한 결과로 판단된다. 이와 같은 결과를 바탕으로 펌프의 전 효율, η_s 를 다음 식으로 계산하여 Fig. 9에 나타내었다.

$$\eta_s = \frac{Q \cdot \Delta P}{2\pi N \cdot T}$$

여기서 Q 와 ΔP 는 각각 워터 펌프 송출 유량 및 펌프 전후단의 압력차를 나타내며, N 과 T 는 각각 펌프의 회전 속도 및 구동 토크를 나타낸다.

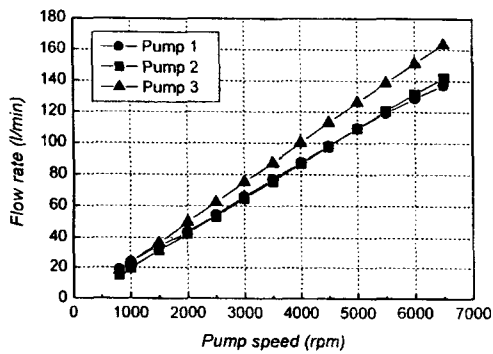


Fig. 6 Flowrate comparison for water pump variation

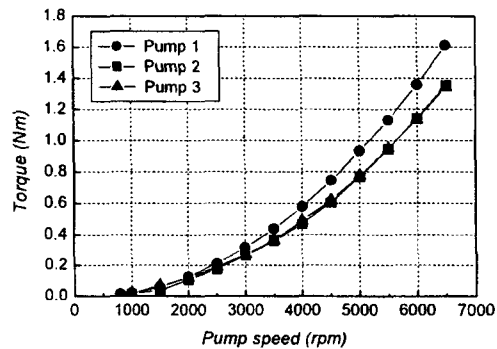


Fig. 8 Driving torque comparison for water pump variation

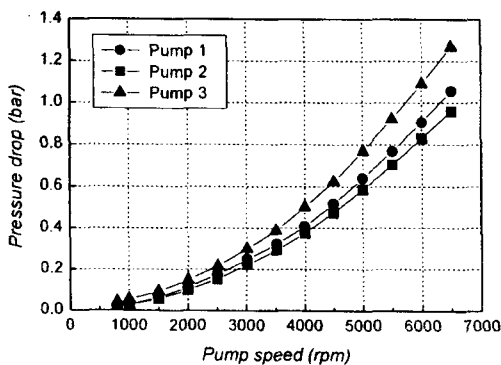


Fig. 7 Pressure drop comparison for water pump variation

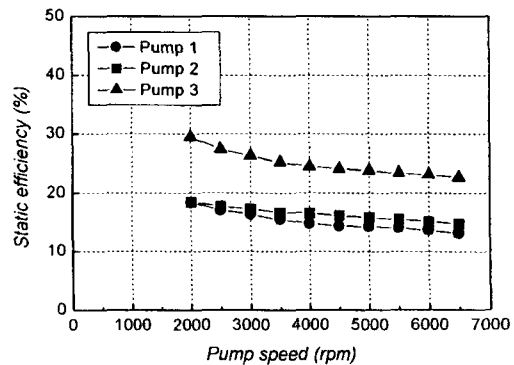


Fig. 9 Static efficiency comparison for water pump variation

Pump 2의 경우 송출 유량은 증가하였으나 압력 강하가 Pump 1 보다 저하하였기 때문에 효율 측면에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, Pump 3의 경우에는 송출 유량 및 압력 강하의 증가, 구동 토크 감소로 인하여 펌프의 전 효율이 증가하였다.

3. 2 헤드 냉각수 유동 가시화

실린더 헤드 내에서의 효과적인 냉각수의 유동 및 유속의 확보는 엔진 냉각 시스템에서 상당히 중요한 부분이다. 열부하 측면에서 상대적으로 취약한 배기쪽의 효과적인 냉각을 위해 배기쪽에서 흡기쪽으로의 횡단하는 냉각수 유동장의 형성 및 냉각수의 적절한 유속 확보 등과 같은 실린더 헤드 내 냉각수 유동장의 최적화는 엔진 성능 및 연비 향상, 배기 가스 저감 등 엔진 성능에 미치는 영향이 매우 크다.

본 연구에서는 실린더 헤드의 열 부하를 개선하기 위한 방법으로 실린더 헤드를 횡방향으로 절단하여 실린더 헤드 내 냉각수 유동을 가시화하였으며, 이 결과를 바탕으로 설계 변형이 상대적으로 용이한 헤드 가스켓 냉각수 통과 유로 위치 및 크기 변경하여 실린더 헤드 내 냉각수 유동 개선을 시도하였다.

Fig. 10은 Fig. 5에 나타낸 실린더 헤드 가스켓으로 냉각수 통과 유로 변경에 따른 유동 가시화 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 10의 (a)에 나타낸 본 실험 적용 엔진의 기본 가스켓인 gasket 1을 장착한 경우의 헤드 내 유동 형태를 살펴보면, 냉각수 주유동이 각각 흡기, 배기로 구별되는 두 주류의 일방향성 유동을 나타내고 있으며, 배기 밸브 주위에서 heat-up source를 제공할 것으로 여겨지는 냉각수의 국부적인 정체 순환 현상이 나타나고 있다. 이러한 냉각수의 일방향성 유동 및 국부적인 정체 순환 현상을 개선하기 위하여 실린더 헤드 가스켓의 냉각수 유로의 패턴을 변경을 시도하였다.

먼저 냉각 성능 향상을 위하여 각 실린더 보어 사이에 냉각수 유로(inter bore hole)를 추가한 gasket 2를 실험 엔진에 장착하였으며, 그

결과를 Fig. 10의 (b)에 나타내었다. 이 경우 실린더 보어 사이에 새로 추가한 냉각수 유로로 인하여 냉각 성능이 향상되는 것으로 추정되는 유동이 형성이 되나, (a)의 경우에서와 같이 일방향성 유동과 국부적인 냉각수의 정체 순환은 동일하게 관찰되어 큰 개선 효과를 기대할 수 없을 것으로 판단된다. 따라서 배기에서 흡기쪽으로 향하는 횡단 유동장을 형성시키기 위하여 헤드 가스켓 흡기쪽 냉각수 유로를 폐쇄한 gasket 3를 제작하였으며 그 결과를 Fig. 10의 (c)에 나타내었다.

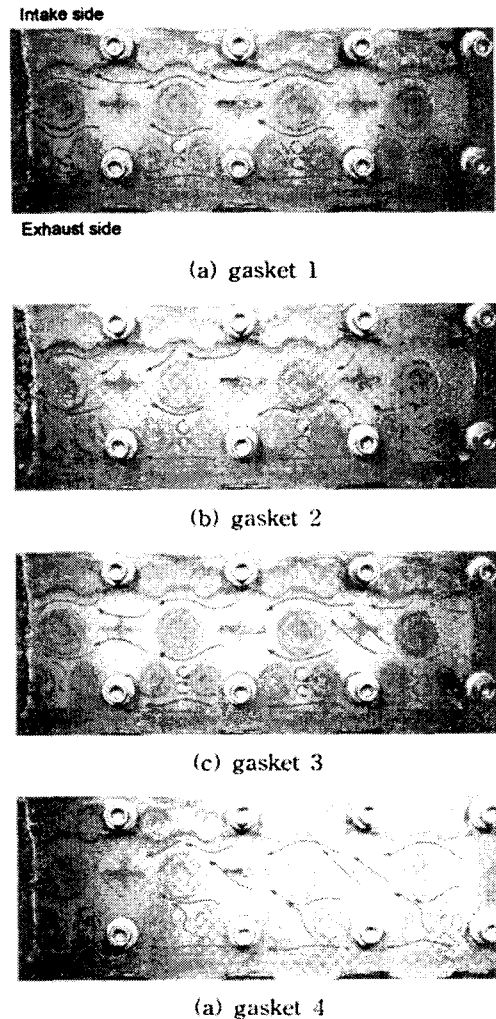


Fig. 10 Coolant flow improvement with head gasket hole tuning

가시화 결과에서 알 수 있듯이 배기측 흡기쪽으로 향하는 횡단 유동장이 형성되고 있는 것을 확인할 수 있으나, 국부적인 냉각수의 정체 순환 유동이 존재하는 것으로 여전히 문제점을 갖고 있는 것으로 나타났다.

이와 같은 국부적인 냉각수의 정체 순환 유동을 효과적으로 제거하기 위하여 헤드 가스켓의 냉각수 유로의 형상을 변경한 경우를 Fig. 10의 (d)에 나타내었다. gasket 4를 장착한 경우의 실린더 헤드 내 냉각수 유동은 배기에서 흡기쪽으로 향하는 횡단 유동장의 형성이 명확하게 나타나고 있으며, 배기 밸브 사이에 존재하던 국부적인 정체 순환 유동이 효과적으로 제거되어 상대적으로 취약한 실린더 헤드의 배기 포트측 열부하를 효율적으로 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.

한편, 실린더 헤드 내 냉각수 유동을 최적화한 gasket 4를 적용했을 때의 워터 펌프의 송출 유량을 본 실험에 적용한 엔진의 기본 가스켓인 gasket 1을 장착했을 때와 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 선도에서 나타나듯이 냉각수 유동 개선을 위하여 개발된 헤드 가스켓을 엔진에 장착하여도 냉각수 유량이 변하지 않아 엔진 전체 냉각 용량에도 큰 문제가 없음을 확인할 수 있다.

따라서 gasket 4를 엔진에 적용할 경우 엔진 냉각 용량의 변화 없이 실린더 헤드 내 냉각수 유동 최적화에 의한 엔진 냉각 성능의 향상은 어느 정도 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

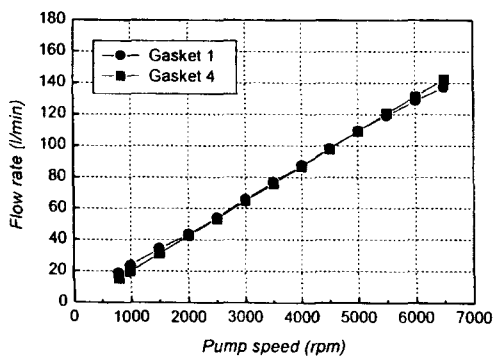


Fig. 11 Pump flow rate comparison for head gasket variation

4. 결론

본 연구에서는 엔진 냉각 시스템의 개선을 위하여 워터 펌프의 임펠러 형상 변경과 재질 경량화에 따른 펌프 효율 향상을 시도하였으며, 상대적으로 취약한 배기측의 열부하 개선을 위하여 실린더 헤드 내 냉각수 유동 가시화를 통한 헤드 내 냉각수 유동장의 최적화를 수행하였다.

그 결과 펌프의 임펠러 형상 변경 및 재질 경량화에 따른 워터 펌프의 유량 증가 및 수두 압력의 증가, 구동 토크 감소에서 오는 워터 펌프 전 효율의 증가를 정량적으로 확인하였다. 또한 실린더 헤드 가스켓의 냉각수 통과 유로를 효과적으로 튜닝 함으로써 실린더 헤드의 열부하 개선이 예측되는 헤드 내 냉각수 유동장을 최적화할 수 있었다.

따라서 이러한 결과를 통해서 워터 펌프의 효율 향상과 실린더 헤드의 열부하 감소에 의한 엔진 냉각 시스템의 성능 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 1) H. Didandeh et al., "Computer-aided design of a water pump impeller for the Chrysler 4.0 liter 6 cylinder engine", SAE 970010, 1997.
- 2) I. C. Finlay and B. I. Parks, "Factors influencing combustion chamber wall temperatures in a liquid-cooled, automotive, spark-ignition engine", Proc Instn Mech Engrs, Vol 199, No D3, 1985.
- 3) Ki-chan Kim, Jae-joon Lee, Mun-soo Chon, Jeong-eui Yun, "A New Approach of Cavitation Criterion Analysis for Automotive Water Pumps", 2000 Seoul FISITA, F2000A135, 2000.
- 4) P. J. Shayler et al., "Effect of coolant mixture composition on engine heat rejection rate", SAE960275, 1996.
- 5) J. I. Lee and N. H. Cho, "Numerical analysis of gasoline engine coolant flow", SAE950274, 1995.