

클린 디젤엔진용 워터펌프 유동해석

이 동 주 · 김 태 영 · 전 문 수*

한국교통대학교 에너지시스템공학과

Flow Analysis of Water Pump for Clean Diesel Engine Application

Dongju Lee · Taeyoung Kim · Mun Soo Chon*

Dept. of Energy System Eng., Korea Nat'l Univ. of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk 380-702, Korea

(Received 2014. 11. 07 / Accepted 2014. 11. 24)

Abstract : Pressure distribution around rotating impeller blades in centrifugal pump has been main issue for design of efficient and high performance automotive water pump. In addition, pressure losses of inlet water pipes should be considered to reduce additional pressure drop and design high performance engine cooling system. In this paper, pressure distribution inside water pump and pressure drop between inlet and outlet of water pump are investigated numerically to design plastic water pump for clean diesel engine application. And the inlet geometry of water pump was considered to analysis the effect of inlet water pipe geometry on pressure distribution around impeller blades and outlet pressure. The prediction results are compared with experimental data to validate and determine optimal operation condition without water pump cavitation. Major design parameters such as blade angle, volute geometry, system pressure, and coolant flow rate are considered to confirm applying possibility of plastic blades to the clean diesel engine.

Key words : Impeller blade, Centrifugal pump, Pressure drop, Cavitation, Design parameter

1. 서 론

엔진 냉각시스템의 최적화는 엔진의 성능 및 연비 향상, 그리고 배기가스 저감 측면에서 매우 중요한 설계 변수이다. 특히 최근에는 엔진의 고출력화 및 연비 향상을 지향하면서 엔진 냉각시스템 최적 설계의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 자동차용 워터펌프로 사용되는 원심펌프는 입구 및 출구의 냉각수 유로, 임펠러 블레이드, 벨류트(volute) 등 복잡한 기하학적 형상으로 구성되어 있으며, 이로 인한 워터펌프 내의 냉각수 유동은 3차원 비정상 난류 유동의 형태를 갖게 된다.¹⁻²⁾ 또한 엔진 냉각수는 실내 온도 조절, EGR 가스 냉각 및 변속기 오일 냉각 등 엔진 온도 제어 기능 이외에도 여러 가지 다양한 기능을 수행하기 때문에 원심 펌프 입구는 매우 복잡한 유로 형상을 갖게 된다.

이러한 이유로 자동차용 워터펌프의 경우, 펌프 입구에서 추가적인 압력 손실이 발생하게 되어 초기에 설계된 임펠러 블레이드의 성능을 저하시키는 원인을 제공하게 되며, 이로 인하여 임펠러 블레이드 입구에서 형성되는 냉각수 흡입 압력과 증발 압력 차이의 상호 작용은 임펠러 블레이드 주변에서 캐비테이션(cavitation)이 발생하는 원인을 제공하기도 한다. 이는 워터펌프의 성능을 저하시키고 소음이나 진동을 발생시키며, 캐비테이션 운전 조건에서 워터펌프를 장시간 구동할 경우 임펠러 또는 케이싱 표면에 부식(erosion)이 일어나기도 한다.

따라서 엔진 운전 특성상 다양한 흡입 조건으로 구동되는 자동차용 워터펌프를 효과적으로 설계하고 성능 및 내구성을 확보하기 위해서는 설계 단계에서 임펠러 블레이드 입구에서의 캐비테이션 발생 원인을 사전에 예측할 수 있는 해석 기술을 적극적으로 활용

*Corresponding author, E-mail: mschon@ut.ac.kr

하여야 한다. 최근에는 다양한 해석 기술 및 캐비테이션 모델이 개발되어 CFD를 이용한 유동해석 기술이 급격히 발달하고 있어 워터펌프의 개발 기간이 단축되고 있으며 펌프의 성능 및 효율 또한 크게 개선되고 있다.³⁻⁴⁾

따라서 본 연구에서는 최근에 강화되고 있는 배기 규제에 대응하기 위한 방안 중의 하나인 클린디젤 엔진용 플라스틱 워터펌프의 개발 초기 단계에서 시작품을 효율적으로 설계 제작하기 위해 플라스틱 임펠러 블레이드와 벌류트 내의 유동을 캐비테이션 발생 모델을 적용하여 이론적으로 해석하였으며, 워터펌프의 설계 유량을 결정하기 위해 다양한 구동 조건에서 임펠러 블레이드 주변의 압력 분포 및 워터펌프의 성능을 예측하였다.

2. 해석 모델

Fig. 1에는 본 연구에 적용한 클린디젤 엔진용 워터펌프의 내부유동 해석 영역인 플라스틱 임펠러 블레이드 및 벌류트의 기하학적 형상을 나타내었다. Fig. 1(a)에 나타낸 임펠러 블레이드는 그림을 기준으로 반시계 방향으로 회전하며, 블레이드 회전으로 형성된 흡입 압력에 의해 유입된 냉각수는 Fig. 1(b)에 나타낸 벌류트를 지나 엔진 실린더 블록으로 유입된다.

Fig. 2에는 해석대상 워터펌프와 워터펌프 입구의 냉각수 유로의 사진을 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 워터펌프의 냉각수 입구유로는 라디에이터, EGR 쿨러 및 트랜스미션 오일 쿨러, Heater Core 등의 유로로 구성된다. 본 연구에서는 EGR 쿨러 및 트랜스미션 오일 쿨러에서 유입되는 입구유로가 90° 직관 및 90° 곡관인 경우에 대한 압력 손실을 비교하였으며, 해석 대상인 입구 유로의 유동해석 영역을 Fig. 3에 나타내었다.

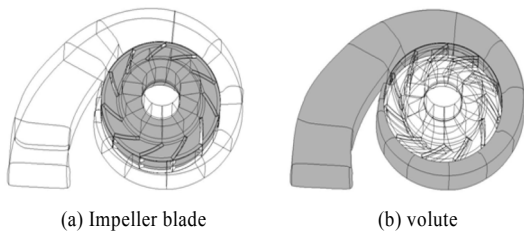


Fig. 1 Geometry of impeller blades and a volute for the flow analysis of an automotive water pump

본 연구에서는 워터펌프 내의 냉각수 압력 분포, 워터펌프 입구의 냉각수 파이프의 압력 손실 및 유량 등을 해석하기 위하여 본 연구에서는 상용 소프트웨어인 CFD-ACE를 사용하였으며 질량 보존 및 운동량 보존 방정식을 포함한 기상 전달 방정식(vapor transport equation)을 계산하였다.

Ashok 등⁵⁾은 가스를 포함한 증발 기체의 질량 분율 전달방정식의 생성항에 나타나는 증발율과 응축율을 국부 압력과 속도 등과 같은 유동 변수와 증발 압력, 기상 및 액상 밀도, 표면 장력 등과 같은 물성치의 함수로 표현하여 나타내었으며, 난류 압력 변동율이 증발 압력에 미치는 영향을 고려한 캐비테이션 모델을 제시하였으며, 본 연구에서는 이를 고려하여 워터펌프 유동해석을 수행하였다.

펌프 입구유로를 고려한 워터펌프 해석모델의 기하학적 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 펌프 입구유로를 고려한 경우 유동해석 영역은 매우 복잡한 기하학적 형상을 갖게 된다. 그림에 나타낸 Case 1은 EGR 쿨러 및 트랜스미션 오일 쿨러에서 유입되는 입구유로가 90° 직관으로 설계한 경우이며, Case 2는 90° 곡관으로 설계된 경우이다. 이상의 펌프 입구유로를 고려한 워터펌프 유동해석 영역에 대한 해석 격자를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다.



Fig. 2 Photograph of a water pump and inlet pipes

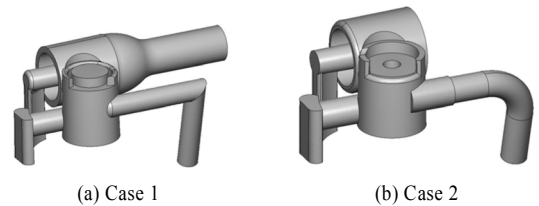


Fig. 3 Geometry of inlet pipes for flow analysis

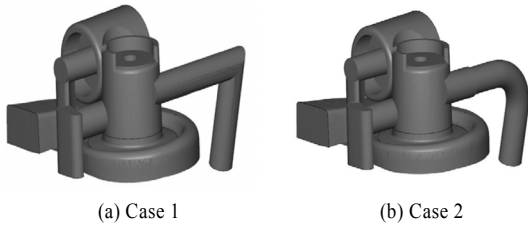


Fig. 4 Geometry of assembly pump

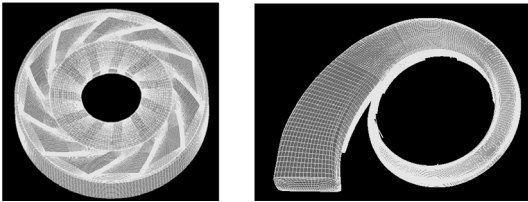


Fig. 5 Computational mesh inside the water pump

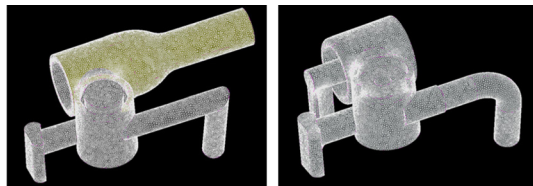


Fig. 6 Computational mesh of the inlet water pipes

Fig. 5에는 워터펌프 내부 유동 해석을 진행하기 위해 생성한 임펠러 블레이드 및 벨류트의 해석 격자를 나타내었으며, 생성한 격자수는 총 60만개의 정렬 격자이다. Fig. 6에는 워터펌프 입구의 유동해석을 위해 생성한 해석격자를 나타내었으며, 생성한 격자수는 Case 1의 경우에는 총 43만개, Case 2의 경우의 총 33만개의 비정렬 격자이다.

일반적으로 엔진 냉각수는 물과 에틸렌글리콜(ethylene glycol, HOCH₂CH₂OH)을 5:5의 체적 비율로 혼합하여 사용하지만, 본 연구에서는 해석을 용이하게 수행하기 위하여 워터펌프 및 펌프입구 워터 파이프 내 유동 해석을 위한 냉각수는 물을 사용하였다. 또한 냉각수 작동 조건으로 냉각수 온도는 써모스탯(thermostat)이 열리는 조건인 90 °C, 엔진 냉각회로의 시스템 압력은 시험 데이터를 참조하여 0.8 bar의 일정한 압력조건에서 해석을 수행하였다. 한편, 본 연구에 적용된 클린디젤 엔진용 워터펌프는 엔진의 크랭크 축과 1.57:1의 기어 비로 설치되어 작동하기 때문에 중속 구간인 2,000 rpm과

Table 1 Working conditions of coolant

System pressure	0 bar
Coolant temperature	90 °C
Coolant	water

Table 2 Properties of coolant

Liquid density	965.3 kg/m ³
Liquid viscosity	0.001 Pa·s
Vapor pressure	3,610 kPa
Vapor density	0.0245 kg/m ³
Air contents	2.3x10 ⁻⁵ mass fraction
Bulk modulus	2.15x10 ⁹ Pa

Table 3 Operating conditions of the water pump

Engine speed (rpm)	Flow rate of coolant (L/min)
2,000	243.9
3,000	265.7
4,000	279.8

3,000 rpm, 최대 회전수 조건인 4,000 rpm의 엔진 회전수를 나타내는 3,140 rpm, 4,710 rpm 및 6,280 rpm의 워터펌프 회전수 조건에서 해석을 수행하였다.

이상의 클린디젤 엔진용 워터펌프 및 냉각수의 작동조건 및 해석조건을 Table 1에 정리하여 나타내었으며, 냉각수로 사용된 물의 물성치 및 워터펌프 구동조건을 각각 Table 2 및 Table 3에 정리하여 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 7에는 중속 엔진 회전수 조건인 3,000 rpm에 해당하는 4,710 rpm의 워터펌프 회전 속도에서 펌프 입구유로의 형상에서 발생하는 유선과 압력 강하 해석 결과를 나타내었다. 해석 결과에서 알 수 있듯이 입구 유로가 90° 직관인 Case 1의 경우 EGR/Oil cooler 워터 파이프 내의 냉각수는 90°의 급격한 각도로 유입되기 때문에 90° 곡관인 Case 2의 경우에 비해 워터 파이프 입구 압력이 매우 높게 형성되고 있음을 확인하게 확인할 수 있으며, 라디에이터 및 Heater core 파이프 입구압력도 상대적으로 높게 형성되고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 워터펌프 입구유로에서의 압력 감소량은 워터펌프 출구 압력인 80 kPa에 비해 상대적으로 작은 값이지만, Case 2의 경우와 같이 90° 곡관의 EGR/Oil cooler 워터 파이프로 설계할 경우 워터펌프

입구유로의 압력강하가 라디에이터 워터 파이프의 경우 약 45.3 % 감소한 4.1 kPa, EGR/Oil cooler 워터 파이프는 약 78.2 % 감소한 2.7 kPa, Heater core 워터 파이프는 약 32.9 % 감소한 4.7 kPa인 것으로 계산되었다. 이상의 압력강하 해석결과를 각 유로의 유량 조건과 함께 Table 4에 정리하여 나타내었다.

한편, 엔진 회전수 변화에 따른 워터펌프 입구의 유로 내의 압력분포를 Fig. 8에 나타내었다. 동일 회전 조건에서 90° 곡관의 EGR/Oil cooler 워터 파이프를 적용할 경우 90° 직관의 경우보다 압력손실이 작아지고 있으며, EGR/Oil cooler 워터 파이프 전체에서 비교적 균일한 압력으로 분포하고, 엔진 회전속도가 증가함에 따라 그 현상이 더욱 뚜렷함을 알 수 있다. 엔진 회전속도가 증가로 인한 냉각수 유량의 증가는 워터 파이프를 지나는 파이프 내의 압력강하의 증가로 나타나지만, 90° 곡관의 EGR/Oil cooler 워터 파이프를 적용한 경우의 압력강하가 Heater core 워터 파이프 압력강하보다 오히려 작게 나타나고 있으며, 이러한 현상 또한 높은 엔진회전 조건에서 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다. 이러한 압력강하 계산 결과를 엔진 회전속도에 따라 정리하여 Fig. 9에 정리하였다. 압력분포 결과에서 설명한 바와 같이 엔진 회전속도 증가에 따른 냉각수 유량 증가로 인한 워터 파이프 내의 압력강하는 전체적으로 증가하고 있으며, 이러한 EGR/Oil cooler 워터

파이프에서 발생하는 압력강하는 비슷한 수준으로 발생하는 Radiator 및 Heater core 워터 파이프 대비 약 2배 정도 크게 발생하고 있음을 정량적으로 확인할 수 있다.

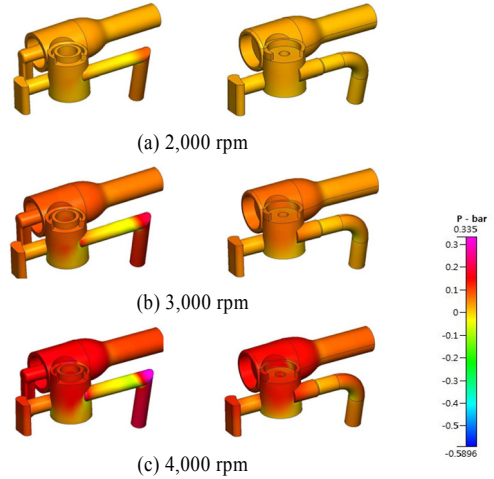


Fig. 8 Comparison of pressure distributions inside inlet water pipes (left: case 1, right: case 2)

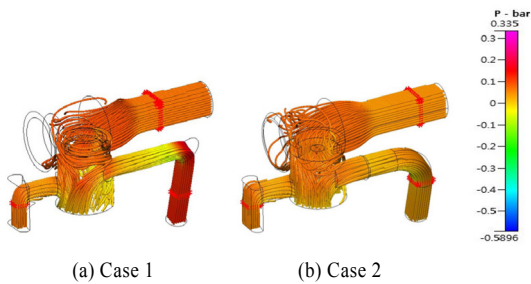
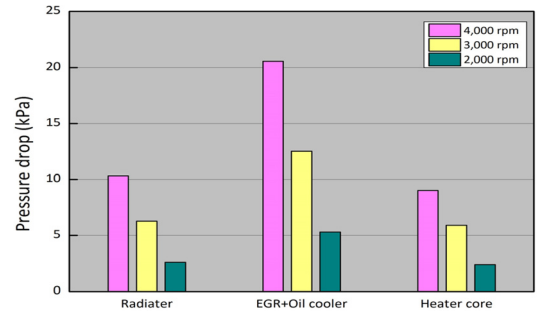


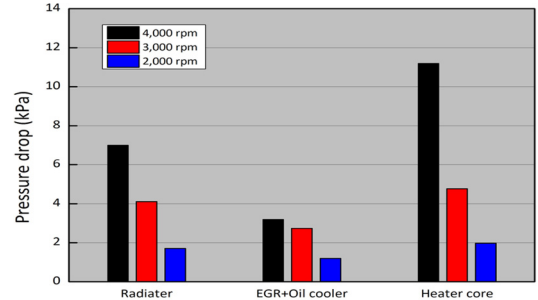
Fig. 7 Streamline and pressure distributions along the inlet water pipes at the engine speed of 3,000 rpm

Table 4 Flowrates and pressure drops along the inlet water pipes at the engine speed of 3,000 rpm

	Flowrate (L/min)	Pressure drop (kPa)	
		Case 1	Case 2
Radiator	122.2	7.5	4.1
EGR/Oil cooler	54.9	12.4	2.7
Heater core	35.3	7.0	4.7



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 9 Comparison of pressure drops through the inlet pipes due to the change of engine speed

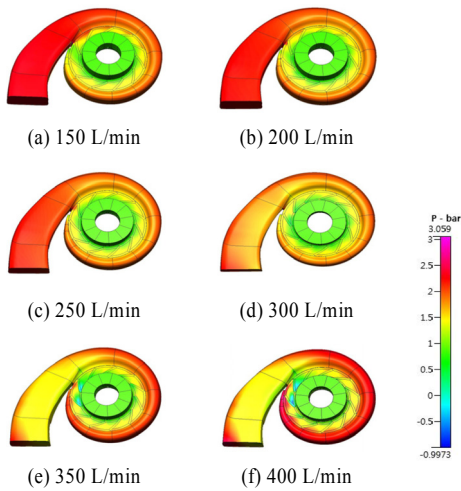


Fig. 10 Comparison of pressure distributions along the volute with variation of coolant flowrates

그러나 Fig. 9의 (b)에 나타낸 바와 같이 90° 곡관의 EGR/Oil cooler 워터 파이프를 적용할 경우 워터 파이프 내의 압력강하가 감소하고 있으며, 특히 EGR/Oil cooler 워터 파이프 내의 압력강하는 약 1/6 수준으로 감소하고 있으며, Radiator 워터 파이프의 경우에도 압력강하가 다소 감소하고 있음을 알 수 있다. 따라서 90° 곡관의 EGR/Oil cooler 워터 파이프로 설계를 변경하여 적용할 경우 미세하지만 워터펌프 입구의 워터 파이프에서 발생하는 압력 손실을 감소시켜 워터펌프의 성능을 향상시킬 수 있음을 이론적으로 확인할 수 있다. 한편, Fig. 9에는 3,000 rpm 엔진 회전속도에서 냉각수 유량증가에 따른 임펠러 블레이드 및 벌류트 내의 압력분포 나타내었다. 냉각수 유량이 증가함에 따라 벌류트 내의 압력 분포는 전체적으로 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 그 변화 경향은 펌프 출구에서 더욱 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 개발단계의 자동차용 플라스틱 워터펌프 시작품을 효율적으로 설계 제작하기 위해 워

터 파이프 형상 변화에 따른 워터 파이프 및 워터펌프 내부의 유동을 해석하였다. 해석 결과 90° 곡관의 EGR/Oil cooler 워터 파이프 적용으로 워터 파이프 내의 압력강하가 감소하고 있음을 정량적으로 확인할 수 있으며, 특히 EGR/Oil cooler 워터 파이프 내의 압력강하를 약 1/6 수준까지 감소시킬 수 있음을 이론적으로 확인하였다. 또한, 다양한 구동 조건에서 각 부분의 워터 파이프 내 압력강하와 펌프 내의 압력분포를 정량적으로 예측하여 그 결과를 설계에 반영할 수 있을 있는 이론적 근거를 마련하였다.

Acknowledgement

이 논문은 2014년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

References

- 1) Motohiko Nohmi and Akira Goto, "Cavitation CFD in a Centrifugal Pump", Fifth International Symposium on Cavitation, Cav03-OS-010, 2003.
- 2) Blanco-Marigorta et al., "Numerical Flow Simulation in a Centrifugal Pump with Impeller -Volute Interaction", ASME 2000 Fluid Engineering Division Summer Meeting, FEDSM200-11297, 2000.
- 3) Cheolho Yun, Mun Soo Chon, Changbok Oh, Seonghwa Choo, and Hyunchul Kim, "Performance and Cavitation Analysis of Plastic Water Pump for the Clean Diesel Engine Application", KSAE Spring Conference Proceedings, 2013.
- 4) Dongju Lee, Tae Young Kim, Mun Soo Chon, Changbok Oh, Seonghwa Choo, and Hyunchul Kim, "The Effect of Inlet Water Pipe Geometry on the Performance of Automotive Water Pump", KSAE Spring Conference Proceedings, 2014.
- 5) Ashok K. Singhal, Mahesh M. Athavale, Huiying Li, and Yu Jiang, "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model", Journal of Fluids Engineering, Vol. 124, p.617~624, 2002.