

전산유체역학을 이용한 워터펌프 축력 저감

조 석 현* · 신 동 성

두산인프라코어 엔진설계팀

Reduction of the Axial Force of Water Pump Using CFD

Sok-Hyun Jo* · Dong-Sung Shin

*Engines & Materials BG, Doosan Infracore, 7-11 Hwasu-dong, Dong-gu, Incheon 401-020, Korea
(Received 12 July 2011 / Revised 10 August 2011 / Accepted 24 September 2011)*

Abstract : Computational Fluid Dynamics (CFD) method has been used to investigate the axial force of automotive water pump. As the excessive axial force can make some unexpected problems like impeller interference and coolant leakage we have focused on finding the cause of axial force and its reduction in this paper. First, we have tested the closed type water pump with and without balance hole by the calculation methods. By examining the pressure contour around the impeller, we have found that the axial force arises not only from the pressure difference around shroud but also from the pressure difference around hub. So we have tested two impellers - one is normal open type impeller and the other is open type impeller with modified hub. The results show that the axial force reduction is about 150~200N for normal one and 700N@3000RPM for modified impeller. And the hydraulic efficiency which is important in aspect of engine fuel efficiency is reduced about 6.5% for normal one but increased 4%@3000RPM for modified impeller.

Key words : Axial force(축추력), Closed type water pump(밀폐형 워터펌프), Open type water pump(개방형 워터펌프), Balance hole(밸런스 홀), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Leakage(누수)

Nomenclature

- F : force, N
- T : torque, Nm
- Q : flow rate, L/min
- N : rotational speed, RPM

1. 서 론

당사 V6 형 11L 엔진의 냉각은 엔진 전면에 장착된 냉각수펌프에 의해 엔진 블록과 오일쿨러에 냉각수가 공급되어 엔진 블록과 헤드를 거쳐 써머스타트로 모이게 되고 냉각수 온도에 따라 다시 워터펌프로 돌아가거나 아니면 냉각수 온도 저감을 위

해 라디에이터로 유입된다. 펌프 임펠러의 경우는 블레이드 틈에서의 유동손실을 최소화 하기 위해 밀폐형을 채용하였다. Euro3 엔진 개발 이후 Euro4/5 배기규제 강화와 엔진 출력 증대에 맞춰서 워터펌프 회전수를 증대하여 냉각수 공급량을 증대시켰다. 하지만 임펠러 형상이 밀폐형이기에 펌프 회전수 증가 시 증가한 축추력에 의해 임펠러와 하우징이 간섭되어 소음이 발생하는 현상이 나타났고 장기적으로는 흑연 재질의 쉘 스프링부 마모가 촉진되어 누수가 증가하였다. 이러한 임펠러 축력 과다에 의한 소음 및 누수현상을 파악하기 위해 상용 S/W를 이용하여 해석적 접근을 시도하였고 압력 보상용 밸런스 홀(balance hole)적용을 포함한 다양한 형상의 임펠러를 사용하여 축추력 감소효과를 검토하였다.

*Corresponding author, E-mail: Sokhyun.jo@doosan.com

원심펌프의 축추력을 저감할 수 있는 방법은 밸런스 홀, 배면 깃(back vane), 평행 디스크(balance disk), 양흡입(self balance) 등이 있지만 배면 깃은 주로 개방형 회전차에 적용되며 평행 디스크와 양흡입은 고압 다단펌프에 적용되는 관계로 실제 자동차용 원심펌프에 적용될 수 있는 기술은 밸런스 홀 외에 없다. 하지만 현재 적용되고 있는 임펠러에는 이미 압력 보상 밸런스 홀이 적용되어 있으므로 추력을 저감키 위해 새로운 방안을 모색해야 한다. 물론 이러한 형상 변경으로 필요 이상의 냉각수를 공급하거나 기존 사양 대비 펌프 소요 동력이 증가하여 엔진 연비가 낮아지는 결과를 낳아서는 안 된다.^{1,2)}

자동차용 워터 펌프에 대한 기존의 연구를 살펴보면 주로 수력 성능 예측 및 효율 증대에 대한 고찰이 있었고^{3,4)} 본 연구와 마찬가지로 수치해석적 방법을 사용하여 추력 저감을 위한 밸런스 홀 적용에 대한 연구가 보고 되었다.⁵⁾ 또한 워터 펌프의 하중 중 하나인 임펠러 고유진동에 의한 베어링 돌출에 대한 연구도 보고 되었다.⁶⁾

2. 본 론

2.1 유동 해석

2.1.1 해석 모델

검토하고자 하는 워터펌프는 Fig. 1과 같고 회전수 3500RPM 에서 냉각수 토출량은 450LPM 이상의 성능을 가지고 있다. 펌프 임펠러 축은 베어링으로 지지되고 있으며 외부와의 기밀은 seal 로 유지되고 있다. 특이한 점은 펌프 입구 중심부에 베어링이 장착되는 구조이기에 유입되는 냉각수가 volute 형상의 입구부를 거쳐서 임펠러 중심부로 유입된다.

펌프 임펠러 형상은 Fig. 2와 같고 외경은 $\phi 136$, 입구부 직경은 $\phi 87$ 그리고 임펠러 폭은 슈라우드(shroud) 포함 20.7mm이다. 추력 저감을 위한 압력 보상 밸런스 홀은 직경 3mm로 2개소에 적용되어 있다.

해석을 위한 격자 모델은 Fig. 3과 같고 격자의 크기는 유동 변화가 가장 심한 임펠러 깃(blade)에서는 0.25~0.5mm, 변화가 크지 않은 입출구단은 1.2mm 수준으로 형상 별로 총 약 120~150만개 수준이다.

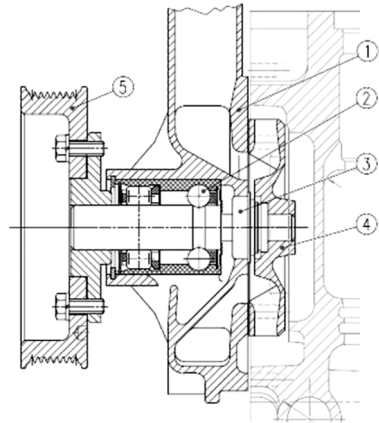


Fig. 1 Water Pump with pulley (① Housing, ② Bearing, ③ Seal, ④ Impeller, ⑤ Pulley)

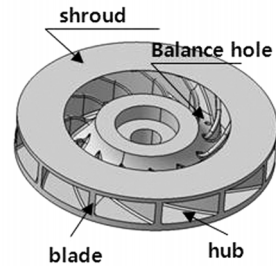


Fig. 2 Water pump impeller - present

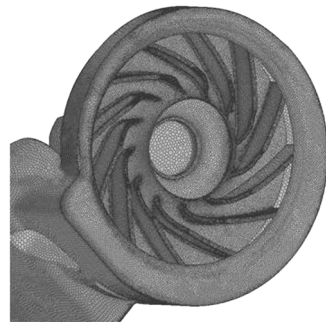


Fig. 3 Computational grids of the water pump and impeller

2.1.2 지배 방정식과 경계조건

워터 펌프 내의 냉각수 유동은 3차원 비압축성 난류유동이며 Reynolds averaged Navier-Stokes equation 에 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하였으며, 벽 근처의 처리는 벽함수를 적용하였다. 지배방정식의 이산화 방법은 운동량 방정식 대류항의 경우 2차 상류차분을 연속방정식의 경우 중앙차분을 사용하였다.

경계조건은 입구부에 대기압 조건을 출구부에 0~2.5bar의 압력 조건을 부여하고 펌프 회전수가 1,000~5,000 RPM 조건에서 계산을 수행하였다. 해석 결과로는 출구부에서의 유량과 임펠러에 가해지는 축추력과 토크를 구하였다. 이때 냉각수 물성치는 25도를 기준으로 밀도 997.1kg/m^3 이며 점도는 $8.881 \times 10^{-4} \text{kg/m-s}$ 을 적용하였다.

2.2 워터 펌프 리그시험

워터 펌프 리그시험 장치 구성은 Fig. 4와 같다. 냉각수 탱크에서 워터펌프에 안정적으로 물을 공급하고 있고 전동모터로 돌아가는 펌프 전후단에 압력 게이지가 설치되어 펌프 차압을 측정하며 유량계는 후단에 장착되어 토출 유량을 측정한다.

펌프 전후단의 압력과 토출량 이외의 토크나 펌프 효율 그리고 축추력은 장치의 한계로 측정하지 않았다. 그러므로 해석과 시험 간의 비교는 전후 차압 변화에 따른 펌프 토출유량 비교만 진행하였다.

2.3 결과 검토

펌프 회전수 3000RPM에서의 유동해석과 리그 시험에서의 토출유량을 비교해 보면 Fig. 5와 같다.

펌프 토출유량은 절대유량에 있어서 차이를 보이지만 차압 증가에 따른 유량 감소 정도와 사양 차이에 따른 유량 차이는 충분히 상대비교 가능한 수준이다. 이러한 해석/시험간 절대 유량의 차이는 리그 시험 장치와 해석에서의 입출구 조건의 형상 차이에서 발생한다고 사료된다.

이제 준비된 해석모델을 사용하여 임펠러 사양간의 축추력을 상대 비교해 보았다. 제일 먼저 임펠러에 기 적용된 밸런스 홀의 축추력 저감효과를 파악하기 위해 홀 적용/미적용 사양에 대한 축추력을 비

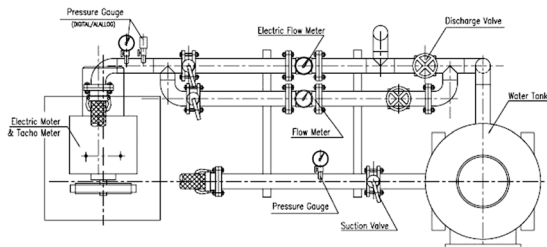


Fig. 4 Test bench of water pump

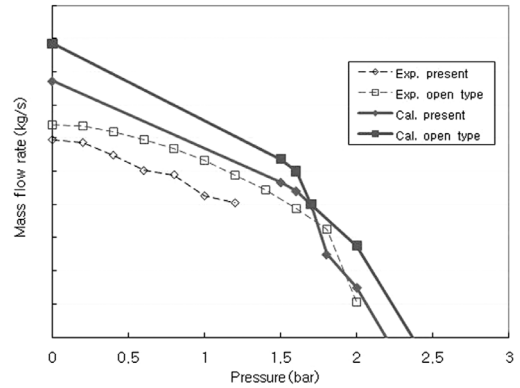


Fig. 5 Mass flow rate of water pump (N=3000RPM)

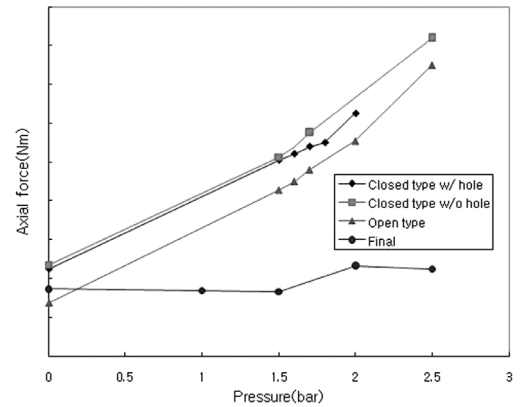


Fig. 6 Pressure contour of the water pump

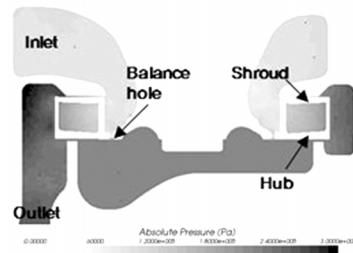


Fig. 7 Axial force of impeller (N=3000RPM)

교하였고 또한 축추력 저감에 유리한 개방형 임펠러와도 비교하였다. 임펠러에 기 적용된 밸런스 홀의 효과는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 차압이 1.5bar 이상일 경우에만 나타나며 그 저감 정도 또한 약 100N@2bar 수준으로 크지 않았다. 개방형 임펠러의 경우는 차압 변화에 따라 약 150~200N 가량의 축력 저감을 나타냈지만 차압의 증가에 따른 축추력

증가의 기울기(약 400N/bar)는 변하지 않았다.

축추력의 근본적인 저감을 위해 그 발생 원인을 파악하고자 펌프 내부의 압력분포를 검토하였다. 그 결과 Fig. 7에 나타난 바와 같이 임펠러 전후에서 발생하는 압력차에 의해 슈라우드(shroud) 면 뿐 아니라 허브(hub)면에서도 축추력을 발생시키고 있는 것을 알 수 있었다. 그러므로 축추력을 근본적으로 줄일 수 있는 방안은 슈라우드 뿐 아니라 허브면도 제거해야 하지만 허브 면을 완전히 제거할 경우 임펠러 기의 강성에 문제가 발생하므로 Fig. 8과 같이 임펠러 강성에 큰 영향을 미치지 않는 허브 외곽면만 제거한 새로운 형상을 검토하였다. 허브 외곽면까지 제거한 개방형 펌프는 차압이 0bar일 때 밀폐형 대비 300N 이상 크게 줄었고 차압 증가에 따른 추력 증가의 기울기도 '0'에 가까워져서 차압 증가에 따라 임펠러 축추력이 증가하지 않는 걸 볼 수 있었다. 결국, 임펠러 추력 감소에 가장 큰 효과는 임펠러의 허브 외곽면 제거이고 그 다음이 슈라우드면 제거 그리고 밸런스 홀 적용이 가장 작은 효과를 보였다.

그 외 다른 펌프성능을 살펴보면(Table 1) 임펠러가 개방형으로 바뀌면서 슈라우드 제거에 따른 임펠러 폭 증가의 효과로 펌프 토출유량이 증대하였고 그에 따라 임펠러 회전 토크도 증가하였다.

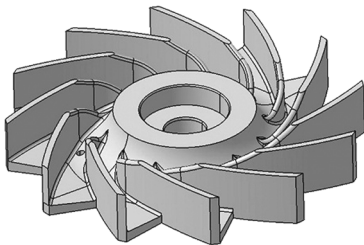


Fig. 8 Feature of modified impeller - Final

Table 1 Hydraulic performance of the water pump (N = 3000RPM, Δp = 1.5bar)

	Present	Open Type	Final
Axial Force (N)	1,120	1,055	531
Mass Flow Rate (Kg/s)	9.34	10.7	10.5
Impeller Torque (Nm)	10.25	12.9	10.52
Efficiency (%) [*]	43.5	37.0	47.5

(*펌프효율은 해석결과를 이용하여 수동력/축동력으로 계산하였으며 기계적 마찰은 고려하지 않았다.)

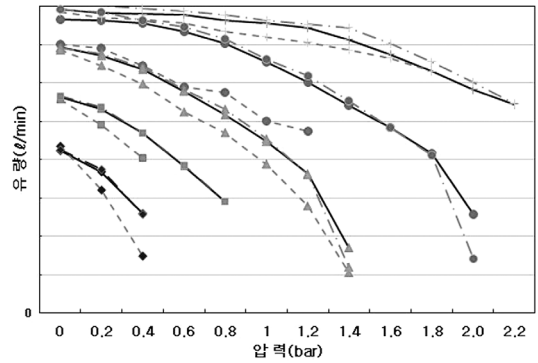


Fig. 9 Flow rate of the water pump (solid line: final, dash-dotted line:open type, dashed line: present, diamond: 1500RPM, square:2000RPM, triangle: 2500RPM, circle:3000RPM, cross:3500RPM)

하지만 토출유량 증가량 보다 임펠러 회전토크 증가가 더 큰 관계로 효율은 6.5% 나 감소하였다. 이는 워터펌프 소요동력을 증가시키므로 엔진 연비 면에서 바람직하지 않은 방향이다. 이에 반해 허브 외곽 면까지 제거한 개방형 펌프는 회전토크 증가 대비 토출유량이 크게 증가하여 펌프효율이 현 사양 대비 4%나 향상되어 엔진 연비에 무리를 주지 않으면서도 토출유량을 증가시키고 축추력을 크게 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

각 사양에 대한 펌프 리그시험 결과는 Fig. 9와 같고 시험을 통해서도 해석에서와 같은 경향을 확인할 수 있다. 펌프를 개방형으로 변경 시 기존 밀폐형 대비 유량증대를 확인할 수 있고 허브 외곽 면까지 제거한 개방형 펌프에서는 추가적인 유량증대는 보이지 않았다.

최종 사양 워터 펌프는 당사 양산 엔진에 적용하여 1년 이상 누수나 간섭에 의한 소음문제 나타나지 않아 해당 임펠러 형상의 축추력 감소 효과를 검증할 수 있었다.

3. 결론

밀폐형 워터펌프에서 발생하는 누수와 임펠러-하우징 간섭에 의한 소음 문제를 해결하기 위한 축추력 저감 방안을 전산유체역학을 도입하여 해석적으로 검토하였다.

일반적으로 축추력 저감을 위해 사용되는 방법인

밸런스 홀 적용과 개방형 임펠러는 제한적인 축추력 저감효과를 보였는데 이는 축추력이 임펠러 슈라우드 전후단 압력차에 의해서만 발생하는 것이 아니라 허브 전후단 압력차에 의해서도 발생하기 때문이었고 이는 임펠러 주변 압력 분포를 살펴봄으로써 알 수 있었다.

밀폐형 펌프에서 단순한 개방형 펌프로의 변경은 제한적인 축추력 감소와 엔진 연비 악화에 영향을 줄 수 있는 펌프 효율 감소로 인해 바람직하지 않은 것으로 나타났다. 하지만 슈라우드 뿐 아니라 임펠러 허브 외곽 면까지 제거된 개방형 임펠러는 가장 큰 축추력 감소를 보였을 뿐 아니라 펌프 효율도 증가하여 가장 좋은 효과를 보였다. 워터펌프 축추력 감소를 위해 밸런스 홀만 적용하는 것은 가장 작은 효과를 나타냈고 그나마 펌프 차압이 일정 이상인 경우에만 효과를 보였다.

후 기

본 연구를 위해 펌프 리그시험을 진행해주신 우일정밀 관계자 분들께 감사드립니다.

References

- 1) S. H. Jo, K. W. Nam and O. S. Kwon, "Fuel Consuming Reduction by Power Steering System Optimization," Transactions of KSAE, Vol.14, No.3, pp.119-124, 2006.
- 2) S. H. Jo and K. W. Nam, "Size and Shape Optimization of the Oil Pump for Fuel Consuming Reduction," Transactions of KSAE, Vol.16, No.1, pp.22-28, 2008.
- 3) H. S. Heo, K. S. Park, G. S. Lee and J. P. Won, "A Study on the Performance Prediction of Automotive Water Pump with Double Discharge Single Suction," Transactions of KSAE, Vol.12, No.3, pp.27-36, 2004.
- 4) H. S. Heo, G. S. Lee and S. J. Bae, "Effect of Shape of Discharge Port on Hydraulic Performance of Automotive Closed Type Water Pump," Transactions of KSAE, Vol.14, No.1, pp.39-47, 2006.
- 5) G. S. Lee, H. S. Heo, C. Kim and C. B. Oh, "Effects of the Balance Hole Diameter of an Automotive Closed Type Water Pump on Hydraulic Performance and Axial Force," Transactions of KSAE, Vol.16, No.3, pp.111-117, 2008.
- 6) C. H. Yang and M. S. Han, "Design Modification of Bearing Walkout of Water Pump by a Finite Element Analysis," Transactions of KSAE, Vol.14, No.3, pp.164-169, 2006.