

터보펌프용 연료펌프의 내부 유동 해석

최범석* · 윤의수* · 박무룡*

Numerical Analysis of Fluid Flow in a Fuel Pump for a Turbopump System

B. S. Choi*, E. S. Yoon*, M. R. Park*

Key Words: Turbopump(터보펌프), Fuel pump(연료펌프), Centrifugal Impeller(원심 임펠러), Inducer(인듀서), Flow Analysis(유동해석)

ABSTRACT

A fuel pump for a turbopump system has been designed under an international co-work program. The liquid methane fuel pump has an inducer, in front of centrifugal impeller blades, to improve cavitation performance. The three dimensional viscous flow in the fuel pump was investigated through numerical computation. An arrangement of the inducer and impeller has yielded a strong interaction between inducer and impeller blades. The performance of the pump was evaluated from the calculated results. A parametric study was performed for various design variables, and it could offer a database for design parameters to design a fuel pump. A modified design of a fuel pump was proposed by KIMM to improve pump performance.

1. 서 론

우주개발이나 방위산업의 발전은 일반적인 경제논리와는 다른 관점에서 보아야하며, 해외에 의존할 수 없고 기술적인 자립을 해야하는 국가 기간산업으로서 중요성이 강조된다. 터보펌프는 액체연료를 사용하는 추진체나 유도무기의 핵심부품으로, 터보펌프의 개발은 첨단 우주 및 방위 산업의 발전을 위해서 필수적이다. 고체연료를 사용한 로켓은 1970년대부터 군용으로 연구개발이 이루어진 바가 있어, 일부 경험이 축적되었으나 터보펌프를 사용한 액체연료 로켓에 대한 국내 연구는 극히 미미한 실정이다. 한국기계연구원에서 1994년부터 1996년에 걸쳐 고성능(소유량, 토출압 3000psi) 터보펌프를 개발하였으며,⁽¹⁾ 용도는 유압유를

가압하여 이를 사용하는 펌프로 소형이지만 그 구성품 및 작동방법은 유사하다. 이는 터보펌프의 설계기술에 대한 체계적인 연구를 시작하는 계기가 되었다. 그러나 일반적인 터보펌프와 같이 인듀서를 장착한 펌프의 설계기술은 여전히 초보적인 단계에 머물러 있었다. 현대모비스를 중심으로 몇 개의 연구기관과 기업들이 공동으로 1999년부터 '고압 터보펌프 개발' 사업을 시작하면서 국내에서도 본격적으로 터보펌프에 대한 연구개발이 시작되었다.

로켓 또는 유도 무기에서 추진체로 사용되는 터보펌프 시스템은 구동 터빈, 연료 펌프 및 산화제 펌프로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 연료 펌프의 수력설계를 위한 유동해석을 수행하였다. 터보펌프 시스템은 러시아의 설계기법을 따라 KeRC(Keldysh Research Center)와의 국제 공동 연구를 통해 1차적인 설계가 이루어 졌으며, 설계된 연료펌프의 주요 설계

* 한국기계연구원 열유체환경연구부

인자들을 Table 1에 요약하였다.

액체 메탄을 연료로 사용하는 고압 터보펌프 시스템의 연료펌프에 대한 기본설계와 인듀서, 임펠러 등 펌프 주요 부품의 상세 형상 설계가 완료된 상태에서, 펌프 내부유동에 대한 3차원 유동해석을 수행하여 유동특성을 분석하고 설계된 펌프의 성능을 평가하고 설계개선 방안을 모색하였다.

본 연구에서는 러시아의 KeRC와의 공동연구에 의한 설계와는 별개의 순수 국내기술에 의한 독자적인 연료펌프의 설계를 수행하여 국내 고유모델에 대한 설계안을 마련하였으며⁽²⁾ 추후 실험을 통해 러시아 설계와의 성능비교를 계획하고 있다. 본 연구에서의 유동 해석 결과들은 연료펌프 국내 독자 모델 설계에 반영되었다.

2. 3차원 유동해석 모델

설계된 연료펌프의 유동해석에 사용된 형상 및 유동조건은 Table 1과 같다. 인듀서와 임펠러, 볼루트로 구성되는 연료펌프의 유동계산을 위해서 터보기계 유동해석 전용 소프트웨어인 TASCFLOW를 사용하였다.

Table 1 액체메탄 연료펌프의 설계조건 및 기본형상

Pump		
Mass Flow Rate	9.0	[kg/s]
Inlet Total Pressure	0.3	[MPa]
Inlet Temperature	110.0	[K]
Rotational Speed	50,000	[rpm]
Inlet Density	424.0	[kg/m ³]
Outlet Total Pressure	15.3	[MPa]
Outlet Temperature	120.82	[K]
Total Efficiency	63.7	[%]
Inducer		
Inlet Tip Diameter	58.0	[mm]
Exit Tip Diameter	42.0	[mm]
Inlet and Outlet Hub Diameter	24.0	[mm]
Number of Blades	2	[-]
Impeller		
Inlet Shroud Diameter	45.0	[mm]
Exit Diameter	96.5	[mm]
Inlet Hub Diameter	43.2	[mm]
Number of Blades	6	[-]

본 연구에서는 연료펌프의 인듀서 및 임펠러 주위의 3차원, 비압축성, 점성, 난류 유동을 해석하였다.

인듀서의 유동과 임펠러의 유동을 각각 따로 계산하는 방법은 인듀서 출구유동 및 임펠러 입구유동에 대한 정확한 정보를 줄 수 없으므로 본 연구에서는 인듀서와 임펠러의 유동을 따로 계산하지 않고 인듀서 유동과 임펠러 유동을 동시에 계산하는 방법을 채택하기로 하였다. 유동계산을 위해서 세 가지 다른 형태의 격자계를 구성하였다. 첫 번째는 한 개의 인듀서 블레이드와 한 개의 임펠러 블레이드에 대한 격자계가 각각 구성되고 이 두 격자계의 연결 경계면에서는 원주 방향으로 평균화된 유동정보가 한 격자계의 경계면에서 다른 격자계로 전달된다. 두 번째 격자계는 하나의 인듀서 블레이드와 세 개의 임펠러 블레이드를 포함하도록 하여 실제 물리적인 영역의 반을 계산영역으로 사용하였다. 세 번째 격자계는 Fig. 1과 같이 두 개의 인듀서 블레이드와 여섯 개의 임펠러 블레이드를 포함하도록 하였으며, 이것은 실제 펌프 전체를 계산영역으로 채택한 것이 된다. 인듀서 격자계와 임펠러 격자계 사이의 공유 경계면에서는 GGI(General Grid Interface) 기법⁽³⁾으로 격자점이 일치하지 않는 부분을 내삽(interpolation)하도록 하였다. 이러한 계산 격자계는 많은 격자수를 필요로 하므로 그에 따른 메모리 용량과 많은 계산시간이 필요로 하지만 실제 계산에서 상대적으로 안정된 해를 얻을 수 있었으므로 세 번째 계산모델을 사용하여 유동해석을 수행하고 parametric study를 하였다. 계산에는 약 34만개의 격자요소

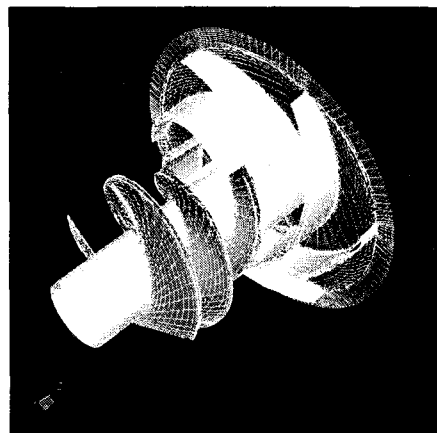


Fig. 1 인듀서 및 임펠러 유동 계산 격자계 (2 inducer blades & 6 impeller blades)

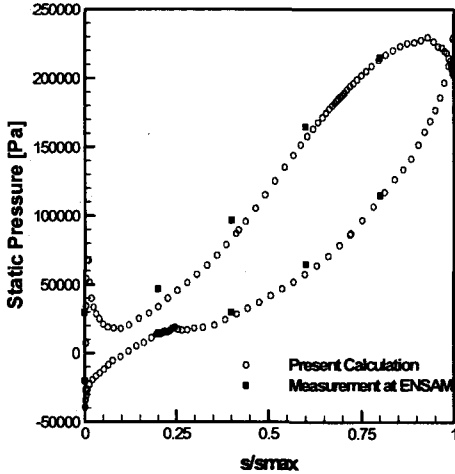


Fig. 2 Static pressure on the blade surface of the mid-section of SHF pump impeller (benchmark test)

(elements)로 구성되는 격자계가 사용되었다. 벽면 근처의 격자크기는 벽함수를 적용할 수 있도록 y^+ 가 30~100 정도의 값을 가지도록 조절하였다.

터보펌프용 연료펌프는 약간의 캐비테이션(cavitation) 발생을 감수하더라도 소형 경량으로 높은 출력을 얻을 수 있도록 설계하므로 캐비테이션에 대한 예측이 필요하다. 그러나 현재 사용한 상용 소프트웨어로는 액체 매탄에 대한 캐비테이션 계산을 할 수 없어 캐비테이션 현상은 고려되지 않았다. 또한 팁 간극(tip clearance) 효과도 팁 부근에서 인두서 격자계 구성에 어려움이 있어 본 계산에서는 포함하지 않았다. 팁 간극은 차후의 계산에 포함하여 영향을 확인해 볼 예정이다.

본 연구에서 사용하는 유동해석 소프트웨어의 신뢰성을 확인하기 위하여 실험결과가 잘 알려져 있는 SHF 펌프^[4]에 대한 유동해석을 수행하여 실험값과 비교하였다. SHF 펌프는 “Société Hydrotechnique de France” 그룹에서 설계한 원심펌프이다. 실험은 설계 유량과 설계유량의 60%에서 수행되었지만 본 연구에서는 유동해석 소프트웨어의 검증차원에서 설계유량에서의 유동만을 계산하였다. 이 계산에서는 약 50,000개 정도의 격자가 사용되었다. Fig. 2에는 펌프 임펠러의 허브와 슈라우드 중간면에서의 블레이드 표면 정압분포에 대한 실험치^[4]와 계산결과를 비교하였다. 계산된 표면 압력분포는 실험에서의 측정치와 잘 일치하고 있음을 보여준다.

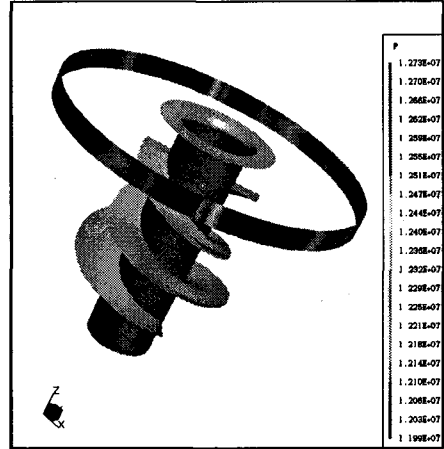


Fig. 3 Pressure distribution at the exit of pump impeller

3. 유동해석 결과 및 검토

Fig. 3은 펌프 임펠러의 출구부분에서의 압력분포를 보여준다. 일반적인 펌프라면 임펠러 블레이드 사이의 각 유로에서의 유동이 거의 차이가 없기 때문에 출구에서의 압력분포도 블레이드의 개수만큼 주기적인 형태를 보여주어야 한다. 그러나 이 연료펌프는 임펠러 앞에 인두서를 장착하고 있으며 날개수가 다른 인두서와 임펠러 블레이드가 아주 근접하여 설치되어 있어 두 블레이드간의 상호작용(interaction)이 클 것으로 예상되었으며, 계산결과에서도 6개의 임펠러 블레이드 사이의 각 유로마다의 압력분포의 차이를 보이고 각 유로를 흐르는 유량의 차이가 나타났다. 이런 현상은 모든 블레이드를 계산영역에 포함시켜 계산을 수행하였기 때문에 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 자오면에서의 유선의 형태를 보여준다. 인두서의 팁쪽 앞전(leading edge) 앞의 입구부분에 큰 재순환 영역이 나타나고 있으며 이 부분에 의한 손실이 상당히 클 것으로 예상된다. 임펠러 출구에서도 재순환이 관찰되지만 실제 펌프에서는 계산에서와 같은 vaneless diffuser가 없고 임펠러 출구에 볼루트가 부착되어 있어 임펠러와 볼루트를 함께 계산하는 방법으로 확인해 볼 필요가 있다. 인두서 앞쪽에서 큰 재순환 영역이 생기는 것은 인두서 상류측의 입구 부분을 확대하여 인두서로 유체가 들어오면서 유로면적이 축소되도록 하면 이 재순환을 없애거나 줄일 수 있을 것

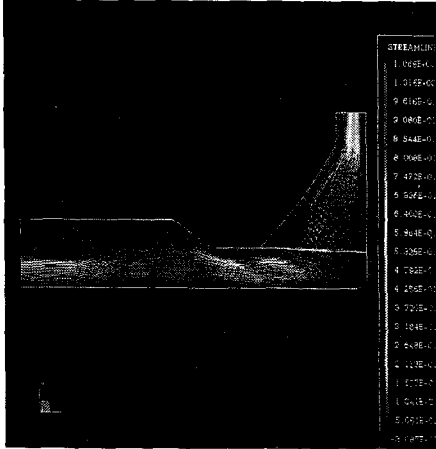


Fig. 4 Streamlines on Meridional Plane

으로 판단된다. 임펠러의 슈라우드측 입구부분과 임펠러 허브면 앞쪽의 구석진 부분에는 유동이 아주 약한 모습을 보여주고 있으며 그 외 나머지 부분은 비교적 무난한 유동패턴으로 보여진다. 그러나 Fig. 4는 원주 방향으로 평균화된 유동형태를 보여주는 것이며, 실제 3차원 임의단면에서의 국부적인 속도분포를 살펴보면 Fig. 4에서 본 것보다 유동이 형태가 훨씬 복잡해 임펠러 부분에서도 손실이 많을 것으로 보인다. 원주방향으로도 유동의 상당한 변화가 있기 때문에 원주방향으로 평균화(적분)된 유동형태와 임의 단면에서의 국부적인 유동형태와는 차이가 있는 것으로 나타났다. 임의 단면에서의 유동은 자오면에서의 평균 유동형태와 달리 임펠러 내부유동이 재순환 영역이나 강한 2차 유동을 포함하고 있음을 알 수 있었다. 이 부분에서의 복잡한 유동현상은 임펠러 입구부분의 유로면적이 갑자기 너무 커지기 때문으로 판단되며 그에 따른 손실 발생을 최소화하기 위해서는 임펠러 입구측의 유로면적을 축소하고 유로를 유선화할 필요가 있다.

Fig. 5는 인듀서의 허브와 슈라우드 사이의 중간면(블레이드 높이의 1/2 위치에서의 면)에서의 블레이드 표면 압력분포를 각각 보여준다. 인듀서 입구에서 출구로 가면서 압력분포는 약 1/3 지점에서 압력의 역전이 일어나고 약 2/3 지점에서 재역전이 일어난다. 인듀서 입구에서 인듀서가 유체에게 일을 하던 것이 중간부분으로 가면서 단면적과 평균 반경이 감소해서, 인듀서 회전애 의한 원심력과는 반대방향인 구심방향으로 유체가 움직이면서 에너지를 잃으면서 구심터빈과

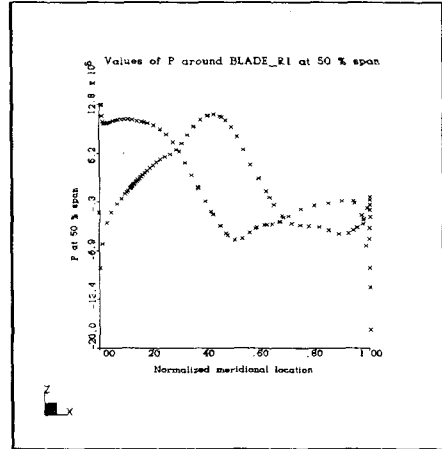


Fig. 5 Inducer Blade Surface Pressure Distribution (Mid-channel)

같이 오히려 인듀서가 유체에게 일을 받는 영역이 나타난다. 이 구간에서의 인듀서 블레이드각도 적절하지 못한 것으로 판단된다. 후반부에서는 다시 정상적으로 인듀서가 일을 하게 되는 것을 볼 수 있다. 이런 이유들로 인해 유체가 인듀서를 지나면서 처음에는 전압이 증가하다가 다시 감소하는 현상이 나타나고, 임펠러를 지나면서 급격히 증가한다. 인듀서가 수두상승에 기여하는 정도가 너무 작은 상태이므로 인듀서의 설계를 재검토해 볼 필요가 있다.

펌프의 양정은 4,113m으로 계산되었는데 이것은 설계 양정인 3,605m보다는 14%정도 높은 값이다. 이것은 본 계산에서 불루트에서의 손실, 설을 통한 누설손실, 팁 간극 손실 등이 고려되지 않았으므로 실제 오차범위는 이보다 작을 것이다. 또한 연료펌프 상세 설계시에 기본설계 단계에서 설정된 양정보다 3%정도 높은 양정을 가질 수 있도록 임펠러 외경을 크게 설계하여 성능시험 단계에서 임펠러 외경을 적절하게 잘라내면서 터보펌프 시스템의 성능을 튜닝하므로 현재 설계된 연료펌프는 설계사양의 양정보다는 3%정도 높아야 한다. KeRC에서는 설계된 연료펌프를 액체메탄을 사용한 실제 운전조건(LCH₄, 110 K, 50,000 rpm) 대신에 물을 사용한 상사 모델실험(H₂O, 288K, 약 10,100 rpm 및 약 15,000 rpm)을 수행하였다.⁽⁵⁾ 상사식에 의한 성능환산은 윤의수 등⁽²⁾을 참고하기 바람에 여기서는 생략하기로 한다. 이 실험 결과에서 나타난 수두, 소요 동력의 측정치는 설계 요구 성능보다 10% 정도 높게

나타난다고 보고되었다. 따라서 계산된 양정은 물을 사용한 모델실험에서 측정된 값과의 차이는 거의 없는 것으로 볼 수 있다.

4. 연료펌프의 개선모델 설계

3차원 유동해석에 의한 성능평가로부터 러시아 설계의 연료펌프는 안정성과 신뢰성 확보에 중점을 두고 있으나 효율이나 성능의 향상 측면에서는 개선의 여지가 많은 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 국내의 독자적인 설계를 통해 기존 설계된 연료펌프를 고성능화하고 자체 설계기술을 확보하고자 하였으며 3차원 유동해석에서 확인된 결과들을 새로운 설계에 반영하였다. 연료펌프의 1차원적인 기본설계는 러시아의 설계기법을 사용하여 재설계를 수행하였으며, 인듀서와 임펠러의 3차원 형상을 독자적으로 설계하였으며 그 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 3차원 유동해석에 관한 바와 같이, 러시아 설계의 연료펌프에서는 쉬라우드측 인듀서 선단 상류부분에서 큰 재순환 영역이 형성된다. 새로운 독자모델의 설계에서는 이 부분에서의 재순환을 억제하기 위해 인듀서 앞부분의 유로면적을 크게 해서 유동이 인듀서로 들어오면서 수축(contraction)되도록 해서 재순환을 방지하고 손실을 줄일 수 있도록 설계하였다. 또한 인듀서 후단부로 가면서 상승했던 압력이 다시 감소하는 현상이 나타나고 인듀서에서 임펠러로 들어가는 부분에서 유로면적이 과도하여 재순환 등의 복잡한 이차유동으로 많은 손실이 발생할 것으로 예견되었다. 따라서 개선된 설계에서는 인듀서 출구에서 임펠러 출구까지의 자오면 형상을 수정하였고 임펠러 입구에서의 유로면적을 감소시켰다. 또한 인듀서의 쉬라우드 형상과 블레이드각이 구간별로 직선적으로 변하도록 설계된 것을 곡선적인 변화를 가지도록 설계개선을 하였다. 러시아 설계의 임펠러가 2차원 형상을 갖는데 비해 고유 설계된 임펠러는 3차원 형상의 블레이드로 설계되었다. 3차원 설계에 의한 2개의 임펠러 모델이 설계되었으며, 첫 번째 모델은 임펠러 블레이드 선단(leading edge)부에서 축방향으로 유체가 유입되도록 설계하였고 두 번째 모델은 블레이드 선단(leading edge)부에서 혼합형(mixed flow) 유로가 설계되었다. 이 독자모델은 추후 성능시험을 수행하여 러시아 설계의 연료펌프와 비교 분석할 예정이다.

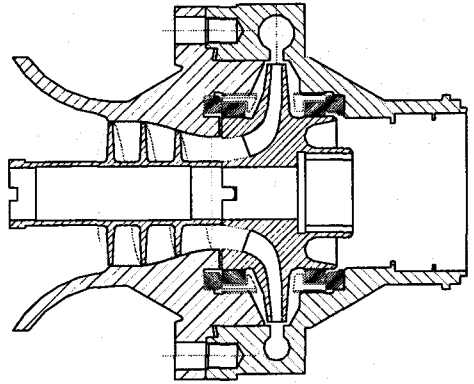


Fig. 6 연료펌프 고유모델 3차원 형상설계

5. 요약

본 연구에서는 터보펌프용 연료펌프의 3차원 유동 계산을 위해서 여러 가지 계산모델을 사용한 계산을 수행해 보았다. 그 중 인듀서와 임펠러의 모든 블레이드를 계산영역에 포함시켜 인듀서와 임펠러의 유동 동시에 계산하는 방법이 많은 계산시간을 요하지만 가장 안정되고 신뢰성 있는 결과를 제공함을 확인하였고 이 계산모델로 설계된 연료펌프 성능을 평가하였고 설계 개선점을 확인하였다. 유동해석 결과와 KeRC에서 물을 사용한 모델실험 결과, 1차원 성능해석자료 등을 분석하여 서방형 고효율 연료펌프 독자 설계 모델을 제시하였다. 또한 여러 가지 형상 설계변수들에 대한 Parametric Study를 수행하였다.

유동해석 결과로부터 다음과 같은 문제점들을 확인할 수 있었다.

1. 케이싱 쪽의 인듀서 앞 부분에 큰 재순환 영역이 나타났고 이것은 펌프성능에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.
 2. 유체가 인듀서를 지날 때 유동면적과 평균반경이 줄어들면서 구심방향의 유동이 형성되고, 압력이 강하여 흡입면과 압력면의 압력이 역전되면서 오히려 인듀서가 일을 받게 된다.
 3. 임펠러 내부에서도 국부적으로 강한 2차유동의 형태가 나타난다.
- 연료펌프의 유동해석 결과로부터 러시아 설계의 연료펌프는 많은 개선의 여지가 있는 것으로 판단되었기에, 본 연구에서는 이 결과들을 반영하여 연료펌프의

고성능화를 위해 국내의 독자적인 연료펌프의 3차원 설계를 수행하였다. 이 고유 설계모델을 추후 실험을 통해 러시아 설계와 성능을 비교할 예정이다.

후 기

본 연구논문은 민군겸용기술사업, “고압터보펌프개발”과제에서 수행된 결과의 일부입니다.

참고 문헌

- (1) 윤의수 등, 1997, “고성능 펌프 설계 용역”, KIMM 연구보고서.
- (2) 윤의수 등, 2001, “터보펌프용 연료펌프의 평균유선 성능해석”, 유체기계공업학회 학술대회 논문집.
- (3) Tascflow user documentation, Ver. 2.10, Vol. 2.
- (4) Combes, J. F., 1995, “Test Case 5 - SHF Radial Pump”, Turbomachinery CFD Workshop”, France.
- (5) Kalmykov, G.P., et al, 2001, “Pumps and turbine model test on KeRC stand results”, KeRC Report.