

터보펌프용 산화제 펌프 설계/해석

최창호* · 김진한*

1. 서 론

액체로켓은 액체 연료와 산화제를 연소시켜 분사시킴으로써 추진력을 얻는다. 이 때 액체연료와 산화제가 가압상태로 연소실에 공급되어야 하며, 크게 두 가지 방식이 있다. 즉, 고압의 연료를 탱크에 직접 저장하는 가압식과 저압으로 탱크 내에 저장된 연료를 터보펌프로 가압시키는 터보펌프 방식이 있다. 가압식은 구조가 간단한 장점이 있지만, 고압을 유지하기 위하여 탱크의 무게가 증가하게 되고 결국 발사체의 구조비가 나빠지는 단점이 있다. 반면, 터보펌프 방식은 고속으로 회전하는 터보펌프와 관련한 진동 및 공동화(cavitation) 제어 등의 고도의 기술을 필요로 하지만 공급탱크의 경량화가 가능하며 추진기관의 구조비를 적게 할 수 있는 장점이 있다⁽¹⁾.

Fig. 1은 산화제 펌프, 연료 펌프, 세퍼레이트 유닛 및 터빈으로 이루어진 터보펌프의 구조를 나타낸다.

일반적으로 산화제 펌프는 높은 흡입성능을 요구하기 때문에 입구에서 손실을 줄이기 위해서 회전 축 방향으로 산화제가 유입되게 설계한다. 또한 산화제와

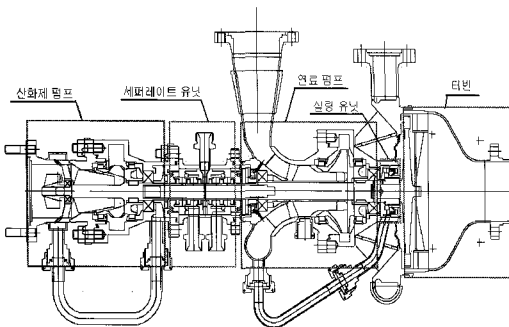


Fig. 1 터보펌프 구조도

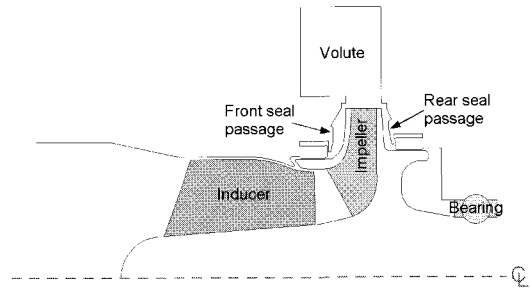


Fig. 2 터보펌프용 펌프 구조도

연료의 섞임을 방지하기 위해서 두 펌프 사이에 세퍼레이트 유닛을 위치시킨다. 오른쪽에 위치한 터빈은 두 펌프를 고속으로 구동하는 역할을 한다.

Fig. 2는 인듀서, 임펠러, 볼류트 및 누설유로를 포함한 산화제 펌프의 구조를 나타낸다. 터보펌프용의 펌프가 일반 펌프와 다른 점은 인듀서가 임펠러 앞에 장착되어있는 것인데, 인듀서는 고속으로 회전하는 임펠러 앞에 장착되어 유효흡입수두 (NPSH)를 낮춰주어 임펠러/볼류트로 구성된 원심펌프가 캐비테이션으로 인한 성능저하 없이 작동하게 한다.

항우연에서는 터보펌프의 국산화 개발과 관련하여 러시아 KeRC (Keldysh Research Center)와의 공동연구를 통해 시제 개발한 기본형 산화제 펌프의 분석 및 유동해석을 수행하여 성능을 예측하였고, 분석 결과를 바탕으로 개선된 설계를 도출하고자 하였다. 참고로 개발대상 터보펌프는 추력 10톤급의 액체로켓엔진용으로 메탄을 연료로 사용한다.

본 연구에서 이러한 산화제 펌프 개발과 관련하여 최근 항우연에서 수행된 설계/해석적 연구를 요약하여 정리하였다.

2. 설계요구조건 및 설계 절차

Table 1에 본 산화제 펌프의 설계요구조건을 나타

* 한국항공우주연구원 터보펌프개발그룹
E-mail : cch@kari.re.kr

Table 1 산화제 펌프의 설계 요구 조건

항 목	값	단위
유량	23.7	kg/s
회전수	50,000	RPM
입구전압력	0.3	MPa
출구전압력	10.3	MPa
입구온도	93	Kelvin
밀도	1110	kg/m ³
기화압력	0.14	MPa
kinematic viscosity	1.68×10 ⁻⁷	m ² /s

내었다. 본 산화제 펌프는 회전속도에 비해서 양정이 작아서 표준 비속도가 340정도로 높고, 유효흡입수두가 15m로 매우 높은 흡입성능을 요구한다. 따라서 수력설계에 어려움이 있다.

산화제 펌프의 설계는 Fig. 3과 같은 과정으로 수행되었다. 1D 기본 설계에서 흡입성능 및 수력성능 등의 주어진 펌프의 설계요구조건에 대하여 기본적인 설계를 수행하고, CAD 작업 및 유동해석을 통하여 인듀서, 임펠러, 볼류트 등 펌프 주요부분의 상세 형상을 구현서 축추력의 적절한 조절이 매우 중요하므로, 1D 기본 설계 후에 축추력에 대한 3D 유동해석을 수행하여 요구조건의 충족여부를 확인하여 설계를 확정한다. 본

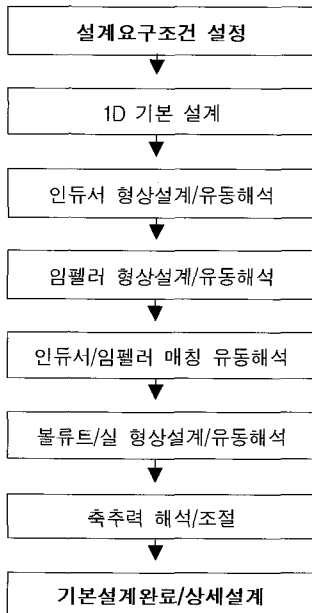


Fig. 3 펌프 설계 흐름도

연구에서는 유동해석에 다수의 연구를 통하여 검증된 Numeca사의 Fine/Turbo가 사용되었다.^{(2)~(6)}

3. 설계/해석의 검증

산화제 펌프의 설계/해석과정에 사용된 유동해석기의 정확성 검증 및 기본형 산화제 펌프의 개선 설계를 위한 성능분석을 위해서 인듀서 및 펌프 전체에 대한 유동해석을 수행하였다.

3.1 인듀서 유동해석

인듀서는 일반적인 펌프와는 달리 터보펌프에만 장착되어 있으므로 이에 대한 연구는 국내에서 충분히 수행되지 않았다. 따라서 터보펌프 설계과정에서 인듀서에 대한 설계의 정확성 및 유동해석의 검증이 필요하였기 때문에 우선 인듀서에 대한 설계/유동해석 및 실험을 통한 검증이 시도되었다.^{(2),(3)}

Fig. 4는 해석과 실험에 사용된 인듀서의 형상 및 측정 센서들의 위치를 보여준다. Fig. 5에 인듀서의 유동해석에 쓰인 3차원 격자를 나타내었다. Fig. 6과 7

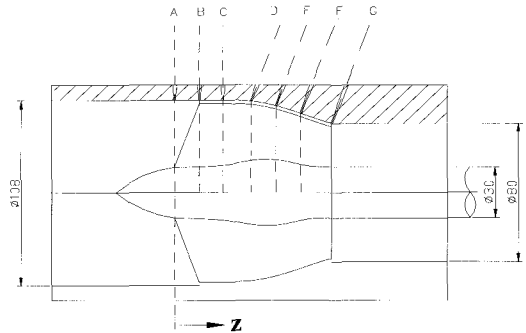


Fig. 4 인듀서 형상 및 측정 센서 위치

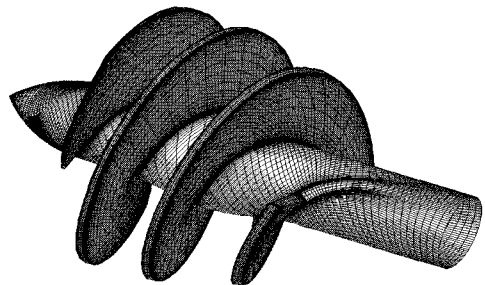


Fig. 5 인듀서 형상 및 격자

에 유동해석결과를 실험결과와 비교하였는데 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 ϕ 는 유량계수, ψ 는 양정계수, η 는 효율을 나타낸다. Fig. 7에서 C_p 는 압력계수를 나타낸다.

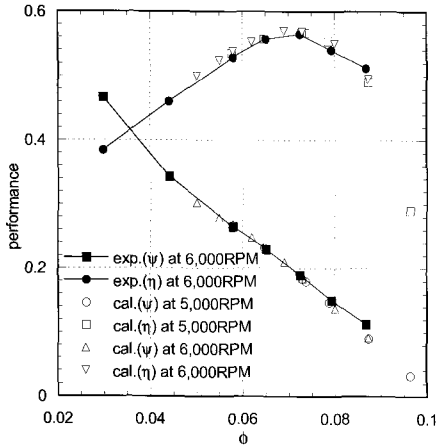


Fig. 6 인듀서 성능 곡선

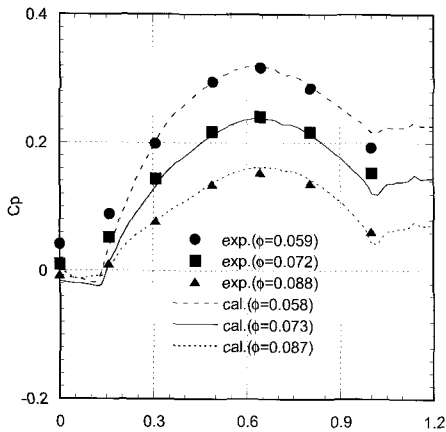


Fig. 7 인듀서 쉬라우드 압력분포

3.2 펌프 전체 유동해석

일반 펌프에 비하여 터보펌프의 경우 제작비용 및 시간이 비교적 많이 소요되기 때문에, 설계에 있어서 펌프의 성능을 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하다. 따라서 펌프의 성능을 좌우하는 볼류트 및 실(seal)을 고려한 펌프 전체 유동해석이 필요한 것으로 판단되었기 때문에, 펌프 전체에 대해서 유동해석을 수행하였고, 실험결과와 비교하였다⁽⁴⁾.

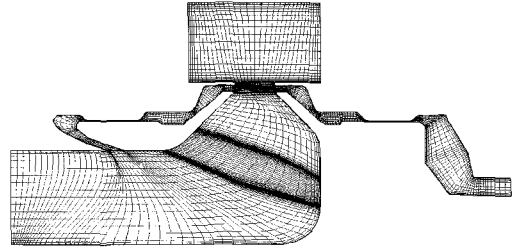


Fig. 8 산화제 펌프 자오면 형상 및 격자

Fig. 8은 앞 및 뒤 누설유로를 포함한 임펠러와 볼류트의 자오면 격자제이다. 고압의 누설특성을 고려한 플로팅 링(floating-ring) 형태의 실이 사용되었다. 뒤쪽 누설 유로의 경우 누설유가 관을 통해 다시 인듀서 입구로 유입되도록 설계되었지만, 형상이 복잡하므로 그림과 같이 출구로 가정을 한 후, 누설시험을 통하여 얻은 누설유량(전체유량의 10%)을 경계조건으로 부여하여 해석을 수행하였다.

Fig. 9는 자오면에서 원주방향 평균된 속도벡터와 유선분포를 나타낸 그림이다. 임펠러 입구 쉬라우드 부근, 앞과 뒤의 누설유로, 볼류트에서 2차유동이 발생하는 등 매우 복잡한 유동구조가 형성된다.

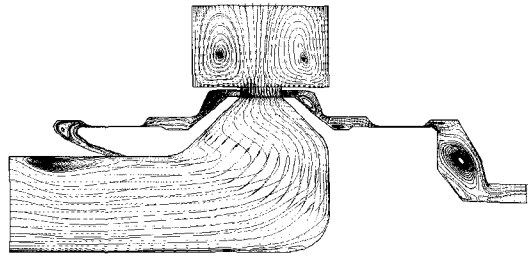


Fig. 9 반경방향 평균 유선 흐름

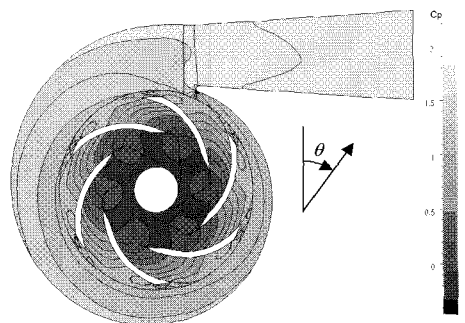


Fig. 10 볼류트 중간면에서의 정압 분포

Fig. 10은 볼류트 중간면에서의 정압 분포를 나타낸 그림이다. 정압은 볼류트 유로를 따라 선회하면서 완만한 증가를 보이다가 원추형 디퓨저에서 크게 상승하며, 혀 (tongue) 부근에서 국부적으로 저압영역이 형성되는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 11은 펌프의 반경방향 힘을 결정하는 볼류트 외면에서의 압력분포를 나타낸다. 설계 유량에서 압력에 유동방향으로 증가하는 것으로 판단하여 볼류트가 다소 크게 설계되어있음을 알 수 있다.

터보펌프의 성능예측을 위해 설계점을 포함한 5개의 유량조건에서 해석을 수행하여 시험결과와 비교하였다. Fig. 12는 계산된 양정계수와 효율을 시험결과와 비교한 Fig.이다. 양정계수와 효율 모두 시험값 보다 약 2~5% 높게 예측하였지만 유동의 복잡성과 펌프의 제작 및 시험의 정확성을 고려하면 전체적인 경향은 잘 일치하는 것으로 판단된다.

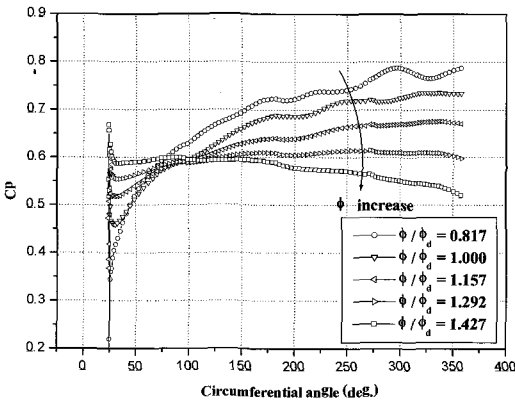


Fig. 11 볼류트 외벽에서의 압력분포

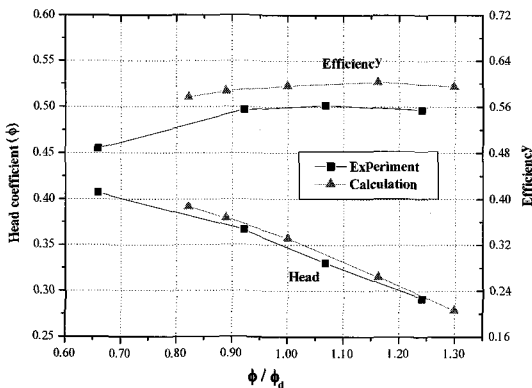


Fig. 12 전체 펌프의 성능비교 곡선

4. 펌프 설계

앞 절의 유동해석법 검증에서 유동해석과 시험이 비교적 잘 일치하였다고 판단되었기 때문에, 러시아 기본형 산화제 펌프의 개선 설계를 위한 노력이 시도되었다. 러시아 기본형 산화제 펌프의 경우 Fig. 12와 같이 수력 효율이 매우 낮게 설계되었기 때문에 효율을 높이는데 중점을 두고 설계를 하였다. 참고로 설계 요구조건은 Table 1과 동일하였다.

4.1 인두서/임펠러 설계

Fig. 13은 설계된 인두서와 임펠러의 3차원 형상 및 유동해석 격자를 나타낸다. 인두서의 경우 흡입성능을 향상시키기 위해서 유량계수를 0.07로 설정하였다. 일반적으로 인두서의 유량계수가 0.08~0.1 정도로 설계되어지는 것을 고려하면 상당히 적은 값이다. 따라서 인두서 블레이드의 입구각경이 상대적으로 크기 때문에 인두서의 앞면에 저압이 발생한다. 임펠러 블레이드 설계의 경우 일반적으로 서방에서 적용되는 설계법을 이용하였다.⁽⁷⁾

터보펌프 설계에서 인두서와 임펠러의 상호작용을 고려하는 것은 매우 중요하다. 인두서를 임펠러 앞에 장착함으로써 흡입성능은 개선되지만, 인두서의 효율이 임펠러의 효율에 비하여 상대적으로 낮으므로 전체 펌프의 효율은 떨어지게 된다. 인두서가 임펠러 앞에 위치하기 때문에 임펠러 입구에 유동의 예선회가 존재한다. 따라서 효율 최적화를 위해서 임펠러 블레이드의 입구각을 인두서 출구의 유동각을 고려하여 적절히 설계해야 한다. 따라서 임펠러의 설계 적절성을 검토하기 위해서 인두서와 임펠러를 동시에 유동해석하였는데, Fig. 14와 15에 결과를 나타내었다. 인두서와 임펠러의 접면에서 유선이 부드럽게 연결되는 것을 확인할 수 있다.⁽⁵⁾

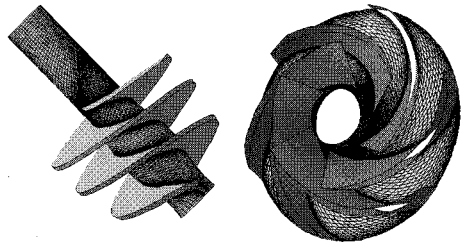


Fig. 13 인두서/임펠러 형상 및 계산격자

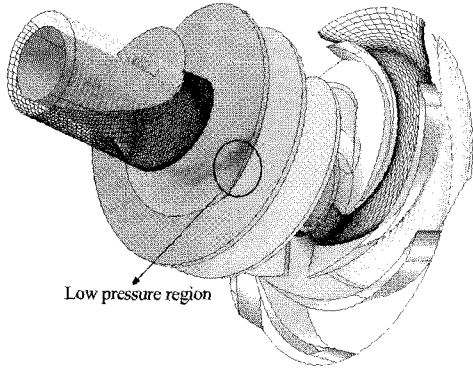


Fig. 14 인듀서/임펠러 유동해석 결과 (표면압력분포)

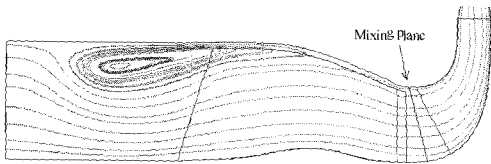


Fig. 15 인듀서/임펠러 유동해석 결과 (유선분포)

4.2 볼류트 설계

앞에서 언급하였지만 볼류트의 적절한 설계는 수력 효율 뿐만 아니라 펌프의 안정적인 운용과 관련이 있는 반경방향의 힘에도 밀접한 영향이 있다. 볼류트 단독 유동해석으로는 이러한 경향을 정확하게 모사하는 것은 어려운 것으로 판단되었다. 따라서 Fig. 16과 같이 볼류트의 설계 적정성을 검토하기 위해서 인듀서와 임펠러 볼류트를 동시에 유동해석 하였다. 인듀서에서부터 볼류트 출구까지 압력이 점차 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

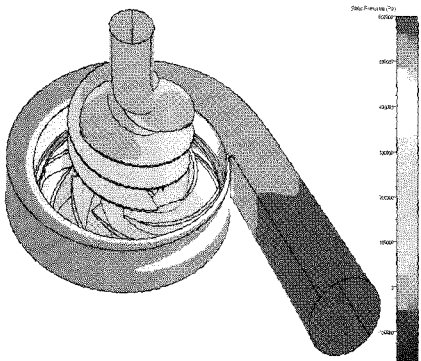


Fig. 16 인듀서/임펠러/볼류트 해석 결과 (표면압력분포)

4.3 보조 인듀서 설계

하나의 인듀서 (주 인듀서)만으로 흡입성능이 설계 요구조건을 만족시키지 못할 것으로 판단될 경우에 보조 인듀서를 주 인듀서 앞에 장착하는 경우가 있다. 그러나 흡입성능을 향상시키기 위해 장착된 보조 인듀서가 주 인듀서의 앞전의 유동을 변화시키기 때문에 수력설계시 이를 고려하여야한다. Fig. 17과 18은 보조 인듀서가 주 인듀서의 유동에 미치는 영향을 관찰하기 위해서 수행된 유동해석 결과를 나타낸다. 보조 인듀서의 존재로 인하여 인듀서 익단의 역류가 크게 앞쪽으로 전파되는 것을 볼 수 있다. 설계시 이를 고려하여 주 인듀서 블레이드 각 분포를 설정하여야한다.

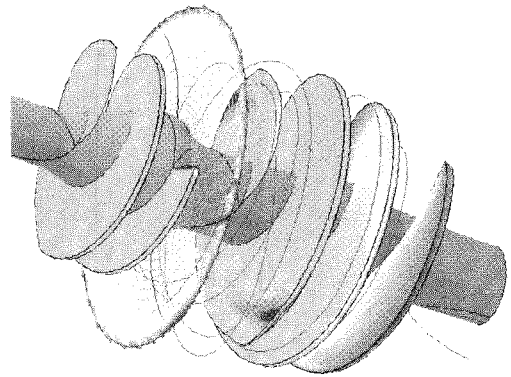


Fig. 17 보조 인듀서와 주 인듀서의 유동해석

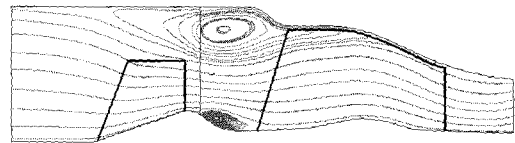


Fig. 18 보조 인듀서와 주 인듀서의 유선분포

4.4 축추력 제어 및 2차 유로 설계

앞에서 언급한 바와 같이 산화제 펌프에 있어서 축추력 제어 및 2차 유로의 설계는 펌프의 안정적인 운용을 위해서 매우 중요하다. Fig. 19에 펌프에 작용하는 축추력을 나타내었는데, 정확한 축추력의 예측을 위해서는 Fig. 9와 같이 펌프 전체 유동해석을 통하여 펌프의 앞/뒤 실의 유동 및 압력을 정확하게 해석하여야 한다. 따라서 항우연에서는 1차원 설계에서 얻어진

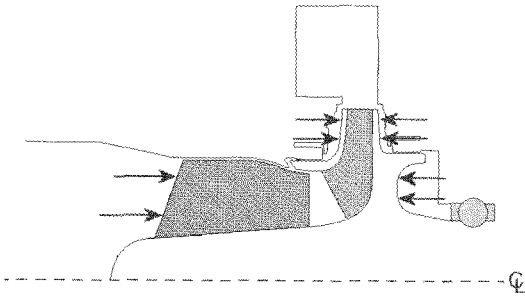


Fig. 19 펌프에 작용하는 축추력

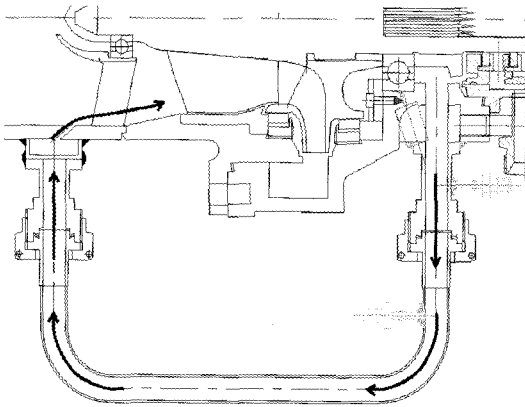


Fig. 20 베어링 냉각 유로

실의 형상을 바탕으로 유동해석을 수행하여 축추력을 예측하고, 실의 적절한 설계변경을 통하여 조절하고 있다. 참고로 개발 대상 산화제 펌프의 축추력은 채택된 베어링의 사양에 따라 최대 1kN으로 제한하였다.

실의 설계에서 또 하나의 중요한 사항은, 뒤쪽 실을 통하여 흐르는 산화제가 베어링을 냉각하는데, 유량이 적을 경우에 베어링이 가열되어 과열될 수 있으므로 역시 최소한의 냉각 유량이 흐르도록 설계하여야 한다. 그러나 너무 많은 냉각 유량이 흐를 경우 펌프의 전체 효율이 나빠질 수 있으므로 적절히 조절하여야 한다. Fig. 20은 설계된 베어링 냉각 유동의 흐름을 나타내었다. 베어링 냉각 유동이 인듀서 앞으로 다시 유입되는 것을 알 수 있다.

5. 결론

이상에서 항우연에서 개발하고 있는 메탄을 연료로 사용하는 추력 10톤급 터보펌프용 산화제 펌프의 주요 부품인 인듀서, 임펠러, 볼류트, 실 및 냉각유로의 설계 절차 및 과정을 간단히 소개하였다. 현재 항우연에서는 개발된 설계절차를 이용하여 펌프를 설계/제작하고 시험기에서 검증하여 보다 정확한 설계를 위한 연구를 수행 중에 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 주관 민군겸용기술사업 연구 개발의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Huzel, D. K. and Huang, D. H., 1992, Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines, AIAA Press
- (2) C. H. Choi, S. S. Hong, B. J. Cha and S. S. Yang, "study on the Hydraulic performance of a turbopump inducer," Proc. of the 2003 Joint ASME-JSME Fluids Engineering Summer Conference, July 6-10, Honolulu, Hawaii, FEDSM 2003-45095
- (3) 최창호, 홍순삼, 김진한, 2003, "인듀서 성능예측에 대한 수치해석적 연구," 한국항공우주학회지, 제 31권, 제 6호, pp. 72~78
- (4) 최창호, 이기수, 김진한, 양수석, 이대성, 2002, "액체로켓용 터보펌프 성능예측에 대한 수치해석적연구," 유체기계저널, 제 5권, 제 2호, pp. 15~21
- (5) 최창호, 김진한, 2003, "액체로켓용 터보펌프 인듀서/임펠러 상호작용에 대한 연구," 유체기계저널, 제 6권, 제 4호, pp. 50~57
- (6) Fine/Turbo 5.3 Manual, 2002, Numeca Inc.
- (7) CCAD 7.6 Manual, 2002, Concepts NREC.