

액체로켓엔진용 터보펌프 제작

정동환* · 홍석호* · 조용호*

1. 서 론

민군겸용기술개발사업 “고압 터보펌프개발”을 통해서 개발된 액체로켓엔진용 고압 터보펌프의 재료 및 제작기술에 대해서 소개하고자 한다. 액체로켓엔진의 핵심 구성품인 터보펌프는 추력실로 고압의 추진제를 공급하는 역할을 하며, 가스발생기에서 생성된 고온, 고압의 연소가스에 의해서 터빈이 고속 회전을 하고, 동일 축 상에 구성된 임펠러에 의해서 추진제로 에너지를 전달한다.⁽¹⁾ 터보펌프는 20,000~50,000 rpm의 고속으로 회전할 뿐만 아니라, 펌프는 극저온 추진제 환경에서 안정적으로 작동하여야 하는 반면, 터빈은 고온, 고압의 연소가스 환경에서 안정적으로 작동하여야 한다. 또한, 산화제와 연료가 접촉할 경우에는 폭발이 발생하기 때문에 터보펌프는 재료 선정에서부터 단품 제작 및 조립까지 매우 복잡하고 다양한 문제를 고려하여야 하며, 진공브레이징과 5축 방전가공과 같은 특수 공정의 개발이 필요하다.

2. 터보펌프의 구성

본 사업에서 개발한 터보펌프는 Fig. 1에 제시된 바와 같이 산화제 펌프, 복합기밀장치 (Integral Sealing Package, 세퍼레이트 유닛), 연료 펌프 및 터빈으로 구성되어 있다. 터빈은 가스발생기에서 발생한 고온, 고압의 연소가스 에너지를 축의 운동에너지로 변환시키는 역할을 하며, 산화제 펌프와 연료펌프는 축을 통하여 전달된 에너지를 추진제에 전달하여 추력실로 공급되는 추진제의 압력을 상승시킨다. 복합기밀장치란 연료펌프와 산화제펌프 사이에 위치하여 연료와 산화제의 접촉을 방지하는 기능을 수행한다.

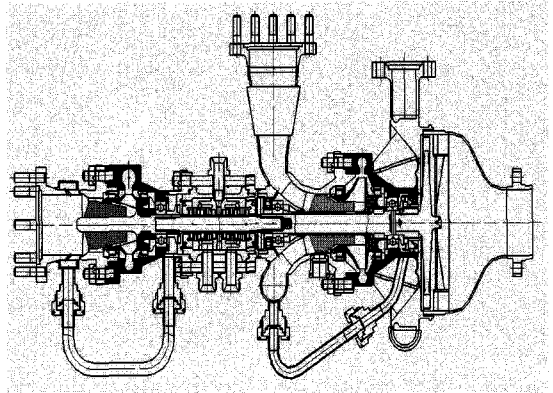


Fig. 1 민군과제 TPU

3. 재료 선정

정적 구조물 (stator)인 펌프 케이싱과 터빈 케이싱 및 각종 파이프류는 안정화 오스테나이트 스테인레스강 (Stabilized Austenitic Stainless Steel)을 사용하였으며, 체결품 등은 고강도 석출경화계 스테인레스강 (Precipitation Hardening Stainless Steel)을 사용하였다.

회전부 (rotor) 중 인듀서, 임펠러, 시일 임펠러 및 축은 고강도 석출경화계 스테인레스강을 사용하고, 고온 환경에서 큰 원심력을 받는 터빈 디스크는 고온 강도가 우수한 Ni계 초합금 (superalloy)을 사용하였다.⁽³⁾

펌프 토출부에서 임펠러 전/후방으로의 누수를 방지하기 위한 Floating Ring Seal은 구리합금을 사용하였으며, 복합기밀장치 내의 시일은 테프론을 적용하고, 연료와 터빈 사이에서 위치한 동적 시일 (mechanical seal)의 접촉재는 graphite를 사용하였다.

개발초기단계에서는 기술 제휴선을 통해 구매한 러시아재료를 사용하여 터보펌프를 제작하였으나, 문헌 고찰 및 재료특성시험을 통하여 모든 재료에 대하여

* (주)로템 기술연구소
E-mail : dhjeng@rotem.co.kr

대체재질을 선정하였으며, 선정된 재질은 정밀 주조 기술을 이용한 펌프 케이싱 제작 및 강도/기밀시험 수행, 극저온 액체산소 환경에서의 작동성 및 성능을 검증하기 위한 시험인 bearing & seal test 등을 통하여 적합성을 검증하였다.

4. 단품 제작 및 조립

펌프 성능에 중요한 영향을 미치는 임펠러, 인듀서는 블레이드 형상이 3차원의 복잡한 형상을 갖고 있기 때문에 대부분의 경우 5축 CNC가공하여 제작하였으며, 블레이드 끝단부에 대한 마무리 사상공정이 펌프의 흡입성능 및 수두에 큰 영향을 주는 것을 파악하였다. 블레이드 형상 및 치수는 3차원측정기를 통하여 측정된 데이터와 CAD 데이터를 비교하여 검사하였으며, 침투탐상검사를 수행하여 가공면 또는 브레이징 접합부에 크랙이 존재하는 지를 검사하였다.

터어빈 디스크는 재료가 가공성이 좋지 않은 Ni계 초합금이며 블레이드의 형상 및 크기가 복잡하고 매우 작기 때문에 방전 가공을 사용하여 제작하였다. 블레이드의 형상 및 치수 검사는 시제품 블레이드를 절단한 후, MTM을 사용하여 검사하였다.

펌프 케이싱은 기계가공 및 주조품 개발을 병행하였다. 기계가공의 경우, 내/외경 선반가공, 외부면/내부면 (volute) CNC 밀링가공, 용접 및 토출부 내경 방전 가공을 하여 제작하였으며, 주조품 개발은 양산 제작을 위한 공정 개발 측면과 Volute 형상이 기계가공으로 구현하기 불가능하게 설계된 제품에 대해서 수행하였다. 용접부에 대해서는 침투탐상검사 및 X-선 검사를 수행하였으며, 제작이 완료된 제품에 대해서는 시험치구를 제작하여 강도/기밀시험을 수행하고, 시험 후 허용할 수 없는 변형이 발생하였지 여부를 관찰하고자 치수검사를 재 수행하였다.

로터 부품들 중 작동 시 마모가 심하게 발생하는 부위에 대해서는 경질 크롬 도금한 다음 연마하여 내마모성을 향상시켰으며, 기밀이 요구되는 부위에 대해서는 온도급한 후 연마 처리하였다.

단품제작 완료 후, 펌프 로터를 조립하고 균형도 시험 (balancing test)을 수행하였으며, 펌프성능시험설비에 장착시킬 수 있도록 치구를 제작/장착하여 성능시험을 수행하였다. 시험 결과에 따라 임펠러나 시일 부품을 수정 또는 신규 제작하면서 제조립 및 제시험을 수행하여 설계 목표치에 부합하는 펌프를 제작하였다.

연료펌프와 터어빈은 하나의 조립체로 구성되어 있으므로 우선적으로 상기한 방법으로 연료펌프 성능시험을 수행한 다음, 터어빈 로터를 조립하고 균형도 검사를 수행한 후, 터어빈 시험치구를 제작하여 터어빈 성능시험을 수행하였다. 터어빈 성능시험을 완료한 후에 터어빈 로터에 연료펌프 임펠러와 인듀서를 장착하고 균형도 검사를 수행하고 최종적으로 연료펌프와 터어빈을 한 부품으로 조립하였다.

복합기밀장치는 Fig. 2에 제시된 바와 같이 복잡한 내부 형상을 갖고 있기 때문에 기계 가공된 단품을 브레이징 접합하여 제작하였다(Fig. 3 참조). 제작된 복합기밀장치에 대해서는 적절한 시험치구를 제작하여 강도/기밀시험을 수행하였다.

산화제 펌프, 복합기밀장치, 연료 펌프 및 터어빈을 금속 가스켓 (metal gasket)을 사이에 설치하고 터보펌프를 조립한 후, 로터의 회전성을 검사하고 30기압에서 기밀시험을 수행하여 연결부에 대한 기밀성을 검사하고 터보펌프의 성능시험을 수행하였다.^{(2),(3)}

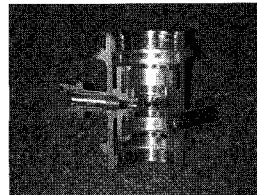


Fig. 2 ISP 브레이징 시제

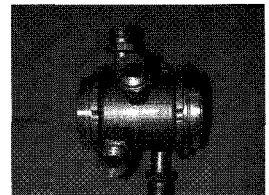


Fig. 3 ISP 완성품

5. 특수공정개발

5.1 임펠러, 복합기밀장치 브레이징 (Brazing)

밀폐형 임펠러 (closed-type impeller)는 정밀주조공정으로 일체 제작하거나 커버와 임펠러 몸체를 브레이징 접합하여 제작할 수 있다. 본 개발에서는 블레이드 끝단에서의 강도, 블레이드 면의 표면조도, 제조비용 등을 고려하여 브레이징 접합하여 개발하기로 결정하였다. 소재는 석출경화형 스테인레스강을 사용하였으며, 커버와 3차원 형상의 블레이드가 가공된 임펠러 몸체를 기계가공한 후, Ni기 삽입금속 (filler metal)을 사용하여 브레이징 접합시키고 요구 강도를 얻기 위하여 진공 열처리하였다. 접합부에서 용융삽입금속의 젖음성 (wettability)를 향상시키기 위한 브레이징 전처리 공정으로는 전해연마를 수행하였다.⁽⁴⁾

복합기밀장치 (ISP)의 브레이징 조건은 임펠러 브레

이징 조건과 동일하나, 사용된 재료가 오스테나이트 스테인레스강이기 때문에 강도 증가를 위한 후 열처리가 필요치 않았다.

5.2 펌프 케이싱 정밀주조

산화제 및 연료펌프 케이싱의 복잡한 형상 및 치수는 일반적인 주조법으로는 구현이 불가능하다. 따라서, 정밀주조법 중에서 가장 정밀도가 높아 복잡한 형상의 제품을 만들 수 있는 정밀 주조를 적용하고 세라믹 셸(ceramic shell) 주형을 사용하여 개발하였다.

러시아 재료와 동일한 조성을 갖는 합금을 시험 주조한 후, 기계적 특성시험을 수행하여 주조한 합금이 러시아 재료 규격을 만족하는지 검사를 하고, 치수별로 일반 공차와 수축율을 조사하여 제품 금형 설계 시 반영하였다. 주조품에 대해서는 X-선 검사를 수행하여 내부결함의 존재여부를 검사하였으며, 합격된 제품에 대해서 도면에 따라 로터와 동심을 요하는 부위 및 체결부에 대해서 후가공을 수행한 후 강도/기밀 검사를 수행하였다⁽⁵⁾.

5.3 터어빈 디스크 블레이드 방전가공 (EDM)

터어빈 블레이드 방전가공 공정은 터보펌프 부품 개발 중 가장 어려운 과정이었으며, 실제품 가공 시 가장 많은 가공시간을 필요로 하였다. 터어빈 블레이드를 방전가공하기 위해서는 터어빈 축을 중심으로 각도를 정확하게 분할할 수 있는 회전 테이블과 방전 전극이 블레이드 사이에서 간섭되지 않으면서 곡선 이동을 할 수 있는 4축 이상의 CNC 방전가공장비가 필요하다. 그러나, 국내에는 이러한 장비를 보유한 업체가 없기 때문에 Fig. 4와 같이 방전전극이 터어빈 디스크 블레이드 입사각과 평행하게 이동하도록 디스크를 경사지게 회전테이블을 설치한 후, 다양한 형상의 전극으로 수차례에 걸쳐서 방전가공을 수행하였다. 이러한 제작 방식은 개별 블레이드 간 형상의 재현성 구현에 문제가 있고, 개별 가공을 수차례에 걸쳐서 수행하여야 하기 때문에 방전가공 시간이 너무 많이 소모된다. 따라서, 블레이드 형상의 균일도 향상 및 공수 절감을 위해서 모든 블레이드를 한번에 가공하면서 개별 블레이드의 형상 및 치수가 동일하게 가공하기 위한 공정을 연구개발 중이다⁽⁶⁾.

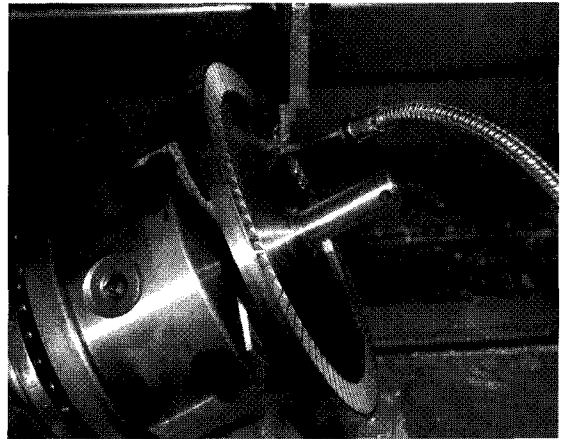


Fig. 4 터어빈블레이드 방전가공

6. 결 론

로템, 비츠로테크, 한돌펌프, 비엠크속은 민군겸용기술개발사업“고압터보펌프개발”을 통해서 액체로켓엔진용 고압터보펌프 개발을 위한 다양한 기술을 습득하였으며, 향후 대형 액체로켓엔진용 터보펌프의 국내 제작을 위한 기반을 구축하였다.

그러나, 액체로켓엔진 개발을 위한 기반이 충분히 구축되지 않은 극저온 베어링과 같은 특수 부품 및 터어빈 디스크용 초합금과 같은 특수 재료는 전량 해외 수입할 수 밖에 없었으며 일부 부품 즉, 터어빈 디스크 블레이드 방전가공과 같은 경우 본 제품만을 제작하기 위한 전용장비의 개발 필요성 등으로 제작비가 너무 상승할 수 밖에 없었다.

향후 이러한 문제점을 해결하면서 효율적으로 터보펌프 및 기타 액체로켓 엔진 구성품을 개발하기 위해서는 장기적인 생산 계획을 수립하여 로트 (lot) 생산을 추진하는 것이 경제적인 것으로 판단되며, 기술 자립도를 높이기 위해서는 특수 전용 소재 및 부품의 국산화 개발이 로켓엔진개발과 더불어 병행되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 “민군 겸용 기술 개발”사업의 과제인 “고압 터보펌프 개발”연구의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- (1) Dieter K. Huzel and David H. Huang., 1992, "Modern Engineering for Desing of Liquid-Propellant Rocket Engines", AIAA, vol. 147, pp. 155~218
- (2) 정동환., 2003, "민군과제 10톤급 고압 터보펌프 No.4 개발 완료 보고서" (주)로템 기술자료, pp. 7~29
- (3) KeRC & Mobis., 2001, "Experimental Turbo Pump ETP000 000", Technical Condition Document, KeRC Moscow.
- (4) 홍석호, 양상용, 이봉주., 2001, "산화제펌프 임펠러 제조공정 개발", 2001 고압터보펌프 Workshop, pp. 70~79
- (5) 김병욱, 남대근, 신해휴., "산화제펌프 케이싱의 정밀주조 기술 개발", 2001 고압터보펌프 Workshop, pp. 51~60
- (6) 정동환., 2003, "TPU 터빈디스크 개발 방안", (주)로템 기술자료, pp. 12~14