

액체로켓엔진 극저온 산화제 배관 제작공정 개발

김진형* · 조황래* · 방정석* · 이병호** · 유재한*** · 문일윤*** · 이수용***

Development of Cryogenic Oxygen Line Manufacturing Process for Liquid Rocket Engine

Jin-Hyung Kim* · Hwang-Rae Cho* · Jeong-Suk Bang* · Byung-Ho Rhee** · Jae-Han Yoo*** · Il-Yoon Moon*** · Soo-Yong Lee***

초 록

액체로켓엔진용 극저온 산화제 고압 배관 기술 개발을 위해 시제품을 제작하였다. 기술 개발 시제품은 체결용 플랜지, 직관, 곡관, 벨로우즈, 분기구로 구성하였다. 액체로켓엔진용 극저온 산화제 고압 배관은 터보펌프에서 토출된 고압의 극저온 산화제를 연소기로 공급하는 경로이므로 극저온, 고압의 작동환경에서 구조적 안정성을 가져야 한다. 따라서 본 제작공정 개발에서는 극저온을 고려한 구조해석을 수행하여 적합한 소재를 선정하였으며, 공정개발과 특수공정을 적용하여 시제품을 제작한 후 구조강도 시험을 수행하였다. 본 개발을 통해 액체로켓엔진에 적용되는 극저온 산화제 고압 배관을 위한 기술적 기반과 소재 응용기술, 향후 고성능 대형 액체로켓엔진에 적용하기 위한 공정 개발을 완료하였다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Oxygen Line(산화제배관), Cryogenic(극저온)

1. 서 론

터보펌프 가압방식의 액체로켓 엔진은 터보펌프를 통해 가압된 산화제와 연료가 연소기로 공급되어 연소된다. 특히, 터보펌프에서 토출된 극저온 산화제는 극저온/고압상태로 연소기로 공급된다. 이러한 과정에서 터보펌프와 연소기를 연결하는 배관은 극저온/고압을 견딜 수 있어야 하고 동시에 중량적으로 최소화 될 수 있는 고강도 소재를 사용하여야 한다. 그리고 복잡한 연결구조를 가지는 엔진에서 조립의 용이성도 함

게 고려되어야 한다. 본 개발에서는 기술개발모형을 바탕으로 구조해석을 수행하고, 이를 만족하는 소재의 선정, 제작 공정 개발, 구조강도 시험을 수행하여 극저온 산화제 배관의 제작 공정 개발과 개발품의 성능을 입증하였다.

2. 구조해석 수행

극저온 산화제 고압 배관 개발을 위한 기술개발 모델의 3차원 형상은 Fig. 1과 같다. 기술개발 모델은 산화제 터보펌프 출구와 연결되는 Flange, Pipe, Elbow, Orifice Flange, Bellows, Tapping Chamber, Spherical Flange로 구성되어 있다. 산화제 배관의 각 시스템의 영향성을 고려

* (주) 비즈로테크 특수사업부 우주항공팀

** (주) 비즈로테크 대표이사

*** 한국항공우주연구원 미래로켓추진팀

† 교신저자, E-mail: jin790220@vitzrotech.com

하여 구조해석에서는 산화제 밸브를 포함하여 구조적인 안정성을 확인하였다.

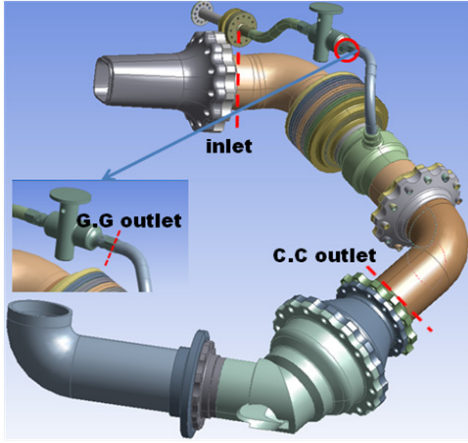


Fig. 1 3D-Model of Oxygen Line

산화제 배관의 재료는 Ni-Base SuperAlloy인 Inconel718을 적용하였다. 본 해석에서는 Inconel 718의 표준 물성을 기준으로 해석을 수행하였다. 정해석 시 하중조건은 온도와 내압으로 나뉘며, 내압은 Table 1에서와 같이 Proof와 Burst로 구분된다. 기준은 Proof압력에서 영구변형이 발생하지 않아야하며, Burst압력에서 파손이 발생하지 않아야한다.[1]

Table 1. Test Pressure

구분	MEOP	Proof	Burst
압력 (bar)	100	150 (MEOP×1.5)	200 (MEOP×2.0)

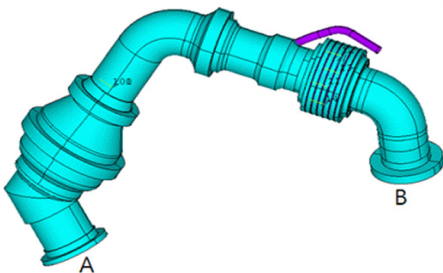


Fig. 2 Structural Model of Oxygen Line

위와 같은 조건으로 산화제 배관에 대해 해석을 수행하였다. 모델의 완전 구속지점은 Fig. 2와 같이 양쪽 입,출구로 지정하였다.

해석결과 Bellows 하우징 부분이 가장 취약함을 알 수 있었으며, 하우징의 두께 및 구조를 변경하여 반복해석을 수행하여 최적의 설계조건을 완성하였다.(Fig. 3, 4)

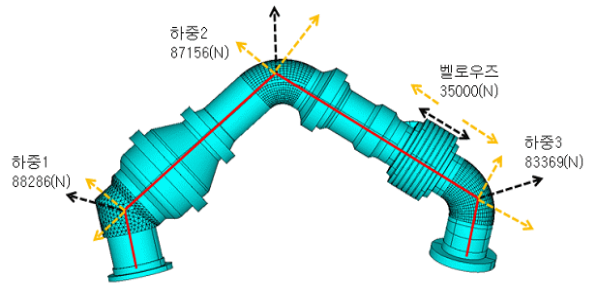


Fig. 3 Axial Load of Oxygen Line

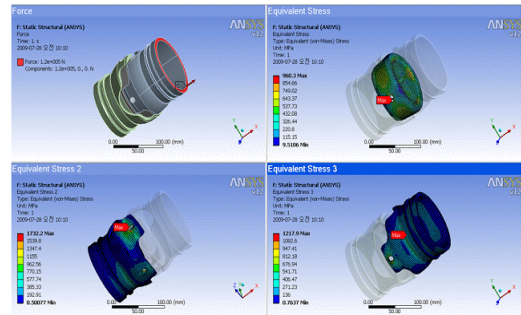


Fig. 4 Change of Stress

3. 소재 및 용접부 특성평가

구조해석을 수행한 결과 열처리를 수행한 두께 2mm의 Inconel718을 적용하기로 하였다. Inconel718은 내식성, 용접성, 피로 및 크리프 특성이 우수한 소재로 잘 알려져 있다. 또한, 극저온에서 고온까지의 기계적 특성이 우수하여 Rocket Motor Casing이나 초전도 구조재 등의 저온 구조물로 사용되며, 액체수소 온도인 -25

3℃에서 650℃까지의 넓은 온도범위에 걸쳐 적용되고 있다.[2]

용접은 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)을 적용하였으며, 직관과 엘보는 성형가공 하여야 하므로 성형 및 용접 후에 열처리를 수행하였다. 용접 후 열처리는 H₂ 분위기에서 Solution Treatment 1060℃ · 1hr, Aging 720℃ · 8hr + 620℃ · 8hr 처리 후 상온까지 Air Cooling 하였다. (Fig. 5)

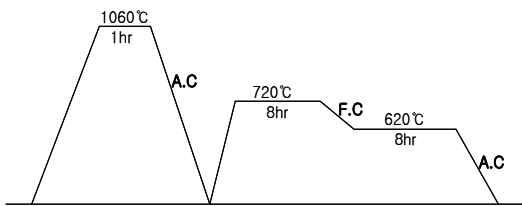


Fig. 5 Heat Treatment of Inconel718 Alloy

접합강도의 분석을 위해 용접 시편을 제작하여 시험을 수행하였다. 극저온 환경에서 Inconel718합금의 용접부는 -50℃, -100℃에서도 양호한 접합강도를 나타내었다. 제살 용접부는 -50℃ 접합강도가 상온과 유사한 1340 MPa를 나타내었으며, -100℃에서는 1400 MPa 이상의 고강도를 나타내었다. 그리고, 용접부 접합시편도 제살 용접부와 유사한 1400 MPa의 고강도를 나타내었으며, 열처리 모재 강도와 유사하다.(Fig. 6)

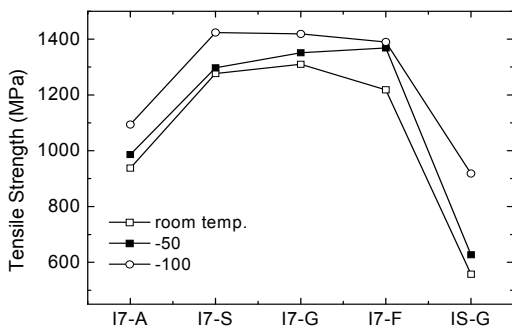


Fig. 6 Tensile Strength of Inconel718 Alloy to Compare Room Temperature with Cryogenic Conditions.

따라서, 용접시편의 상온시험 결과와 저온시험 결과를 바탕으로 산화제 배관의 용접은 용접봉을 사용하지 않고, 제살용접만으로도 충분히 고강도의 특성을 보유할 수 있다.[3]

4. 제작 공정 개발

상기의 해석 결과를 토대로한 상세설계와 시편분석을 통해서 확인된 공정조건을 기준으로 극저온 산화제 배관 시제품을 제작하였다. 전체 시스템을 구성하는 Process는 Fig. 8과 같다.

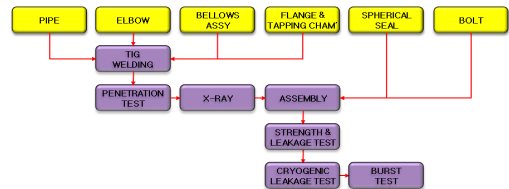


Fig. 7 Cryogenic Oxygen Line Manufacturing Process

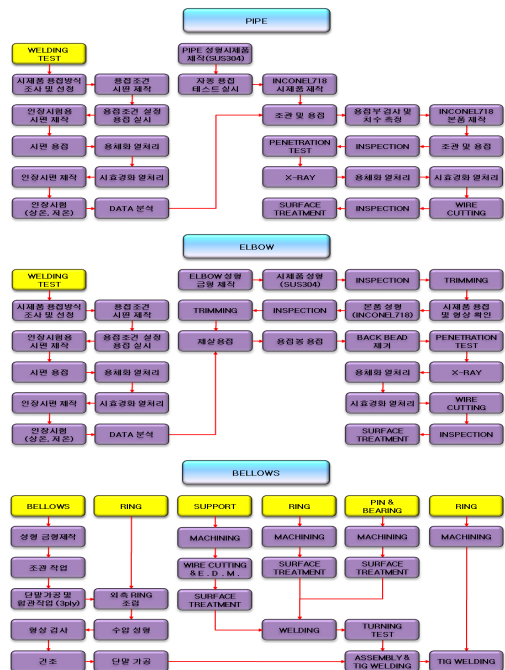


Fig. 8 Sub Assembly Manufacturing Process

산화제 배관을 구성하는 부품별 공정을 Fig. 8과 같이 개발 하였으며, 특히 직관과 곡관은 Inconel718의 높은 강도로 인한 성형가공의 어려움으로 인해 성형가공과 용접을 수행한 후 열처리를 수행하였다. 이를 위해 Annealed된 Inconel718 Plate를 사용하여 성형을 수행하고, 용접하여 형상을 제작한 뒤, 후열처리를 하여 Inconel718의 고강도 특성을 만족하였다.

Figure 9에서는 정립된 공정에 따라 제작된 제품의 실제 공정을 보여준다. 부품별로 개발된 공정에 따라 제작된 모든 부품은 형상규격을 만족시켰으며 전후 Test를 통해 검증되었다.



Fig. 9 Manufacturing of Sub Assembly

최종 완성된 개발품은 Fig. 10과 같으며, 설계와의 일치성을 확인하였다. 완성된 개발품에 대해서 구조적인 안정성을 검증하기 위한 시험을 수행하고 있다. 시험매질은 상온의 수압으로 수행하며, 시험 압력은 Proof 조건인 150 bar이다. 시험 시 변형량 측정을 위해 Strain Gauge를 부착하여 변위량을 확인하기로 하였으며, 시험 결과를 통해 개발품을 검증하고자 한다.

5. 결 론

터보펌프방식의 로켓엔진 공급계 중 극저온 산화제 고압 배관 기술 개발 모델을 설계·개발 하였다. 작동환경, 구조적 특성, 공정 개발 및 확립을 통해 설계를 구현하고 기술적 요구사항을 정립하였다. 개발된 제품에 대해 구조시험을 수행하여 안전기준을 만족하는지 확인하였다.

산화제 고압 배관은 전체 로켓 시스템의 구성에 따라 변화되고 조정되어진다. 따라서 새로운 시스템을 구성할 때 마다 구조적 안정성을 확인하기 위한 해석이 병행되어야 하며, 그에 따른 소재의 검토도 포함되어야 한다.

본 개발을 완료함으로써 설계·해석·소재·공정에 대한 프로세스를 확립하였으며 향후 고성능 대형 로켓엔진 개발에 적용하기 위한 기술적 기반으로 활용할 수 있을 것이다.

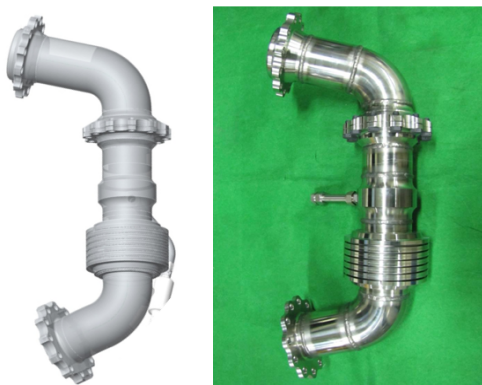


Fig. 10 Cryogenic Oxygen Line Assembly

참 고 문 헌

1. 문일윤, 유재한, 문인상 “액체로켓엔진 액체 산소 고압 배관부 기본설계”, 한국추진공학회 추계학술대회논문집, 2009, pp.107-110
2. "Liquid Rocket Lines, Bellows, Flexible Hose and Filters" NASA SP-8123, 1977
3. 김기홍, 문인상 “극저온 환경에 적용되는 Inconel718합금의 GTAW 기계적 특성 평가”, 한국추진공학회 추계학술대회논문집, 2010, pp.619-622